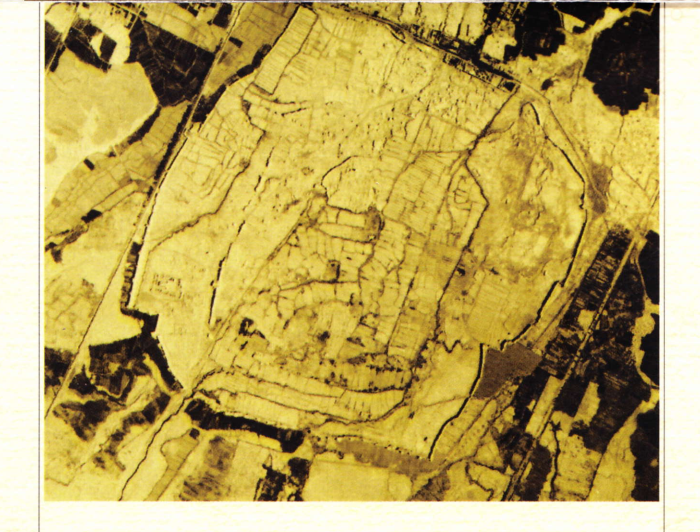


大学文科基本用书 · 考古文博
DAXUE WENKE JIBEN YONGSHU · KAOGUWENBO

北京大学考古文博学院系列教材

考古测绘、遥感与GIS

刘建国 著



Surveying, Remote Sensing and GIS in Archaeology



大学文科基本用书
考古文博

本书根据考古研究的特点，围绕现代电子全站仪测绘、数字摄影测量成图、遥感数据处理与分析以及考古地理信息系统的建设与分析等工作过程，介绍有关考古测绘、遥感与地理信息系统的理论和方法及考古研究中地形图的使用和编制方法等，以期使考古研究人员能够掌握常规仪器的操作和维护，熟练地测绘、使用和编制各种地图，处理和分析各种遥感影像，更好地开展考古学研究。全书体系完整，简明扼要，适于本专科教学使用及考古研究人员参考。

刘建国 任职于中国社科院考古研究所，长期从事考古测量、遥感、地理信息系统以及考古计算机图形图像学等方面的研究、实践工作。自1995年起在北京大学考古系讲授考古测量课程，2007年起在中国社会科学院研究生院考古系讲授考古空间信息技术课程。著有《考古与地理信息系统》，发表学术论文四十余篇。




ISBN 978-7-301-14107-6
9 787301 141076
定价：34.00元



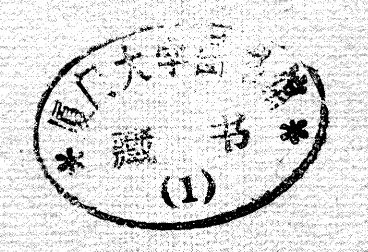
大 学 文 科 基 本 用 书 · 考 古 文 博

DAXUE WENKE JIBEN YONGSHU · KAOGUWENBO

北京大学考古文博学院系列教材

考古测绘、遥感与GIS

刘建国 著







图书在版编目(CIP)数据

考古测绘、遥感与GIS/刘建国著．北京:北京大学出版社,2008.8
(大学文科基本用书·考古文博)
ISBN 978-7-301-14107-6

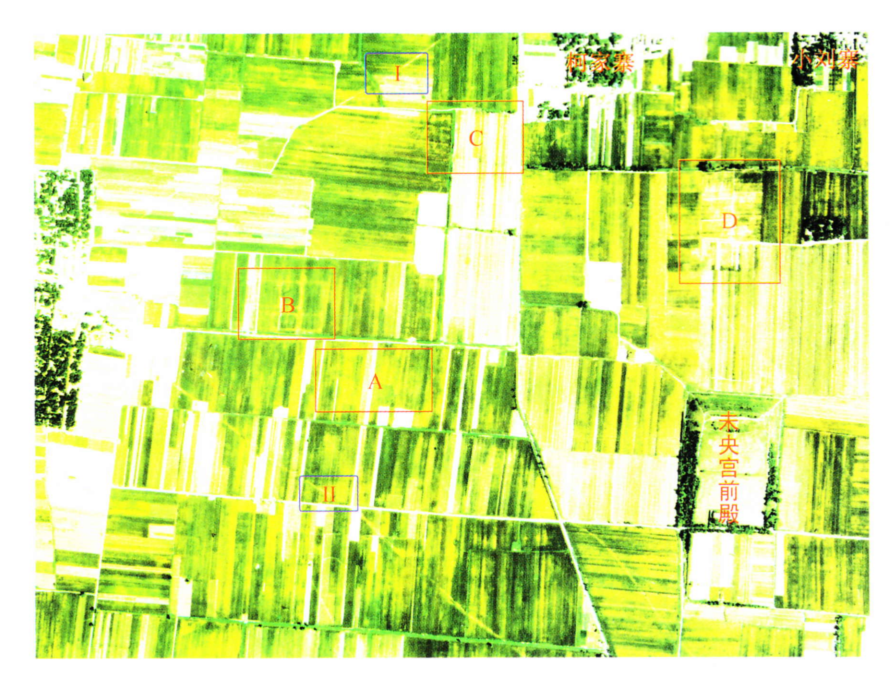
Ⅰ．考… Ⅱ．刘… Ⅲ．①遥感技术-应用-考古学-研究②地理信息系统-应用-考古学-研究 Ⅳ．K85

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第114805号

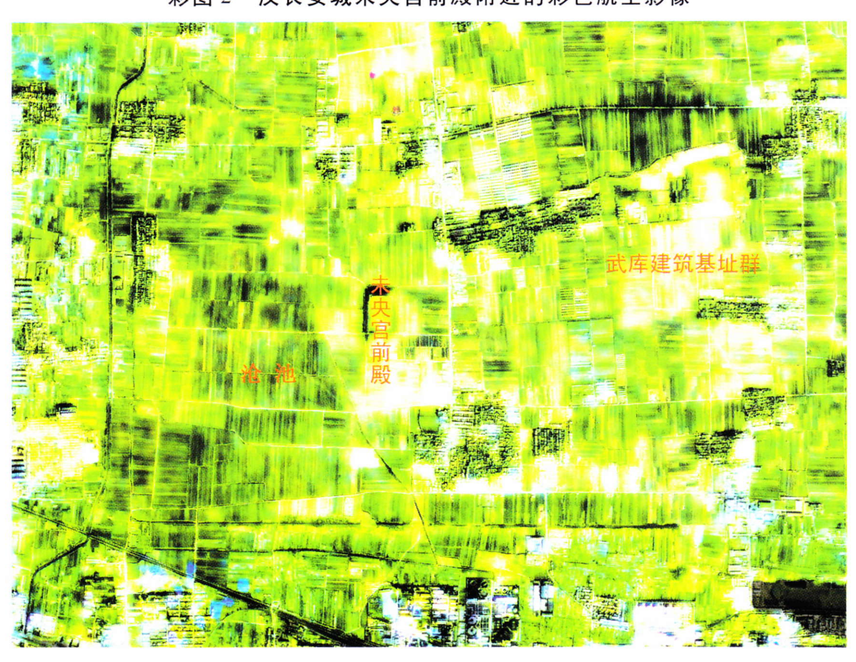
书　　名:考古测绘、遥感与GIS
著作责任者:刘建国　著
责 任 编 辑:张　晗
封 面 设 计:奇文云海
标 准 书 号:ISBN 978-7-301-14107-6/K·0537
出 版 发 行:北京大学出版社
地　　址:北京市海淀区成府路205号　100871
网　　址:http://www.pup.cn　　电子邮箱:pkuwsz@yahoo.com.cn
电　　话:邮购部62752015　发行部62750672　出版部62754962
　　　　　编辑部62752025
印　刷　者:北京汇林印务有限公司
经　销　者:新华书店
　　　　　650mm×980mm　16开本　15印张　彩插8页　230千字
　　　　　2008年8月第1版　2008年8月第1次印刷
定　　价:34.00元



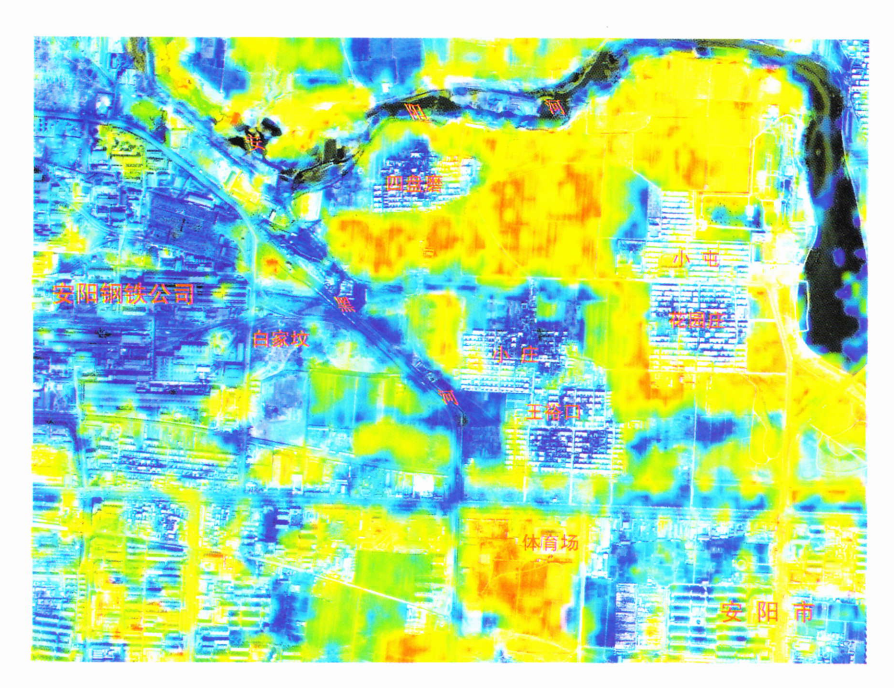
彩图 1　北庭古城彩红外航空影像图



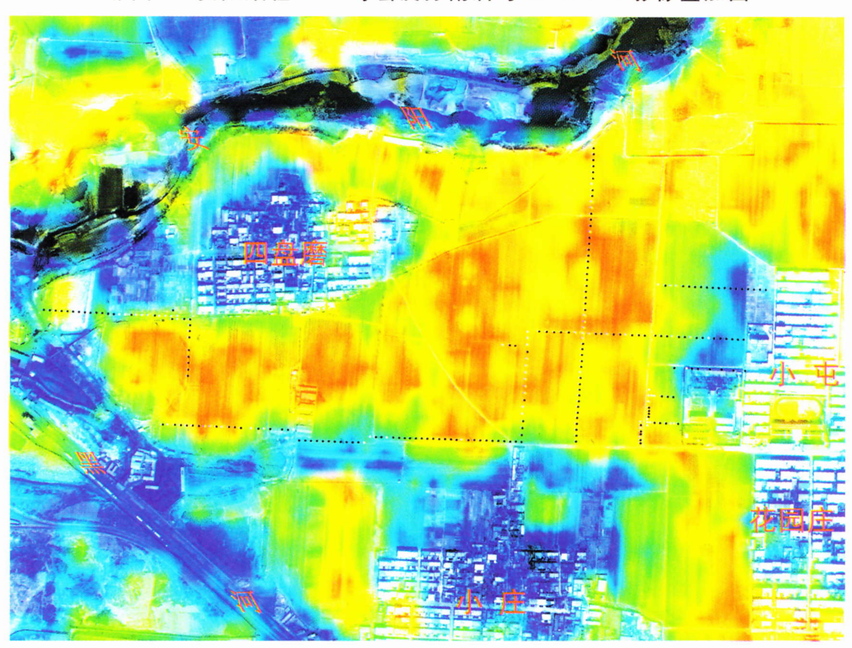
彩图 2　汉长安城未央宫前殿附近的彩色航空影像



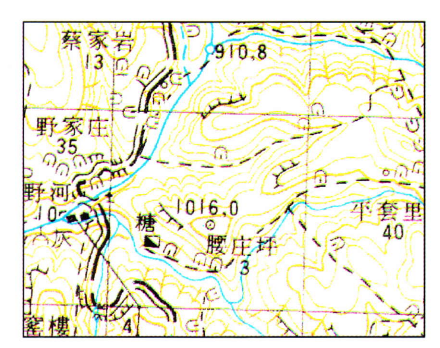
彩图 3　汉长安城未央宫前殿附近航空影像与 TM 影像合成图

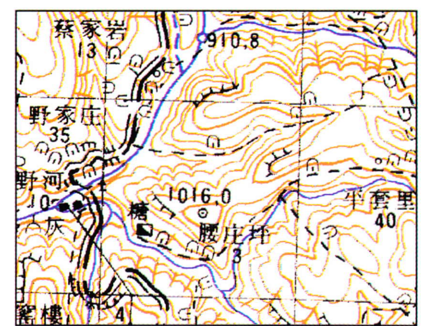


彩图 4　安阳殷墟 TM7 等密度分割后与 Quickbird 影像叠加图

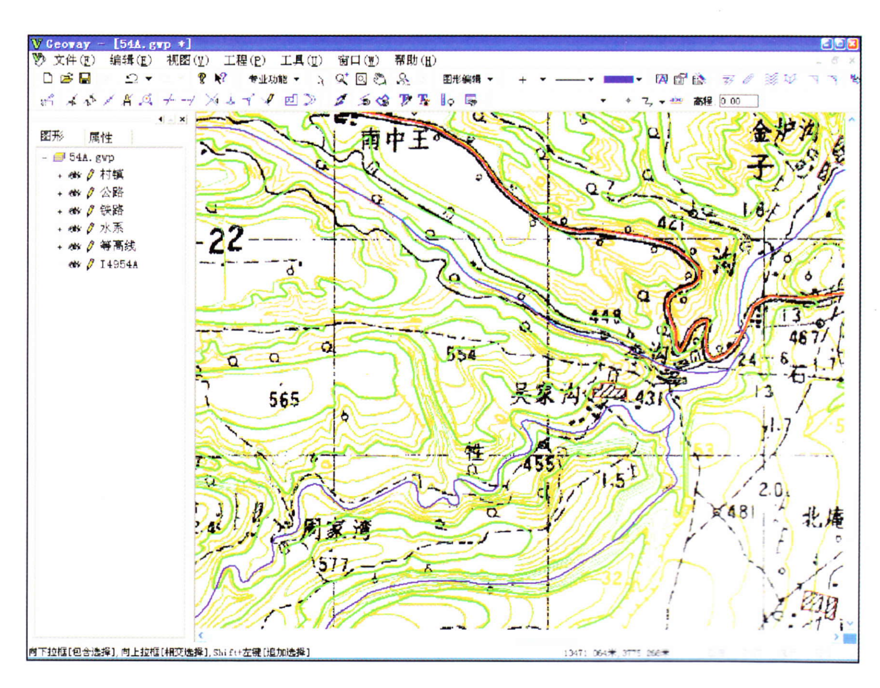


彩图 5　安阳殷墟钻探探孔位置图

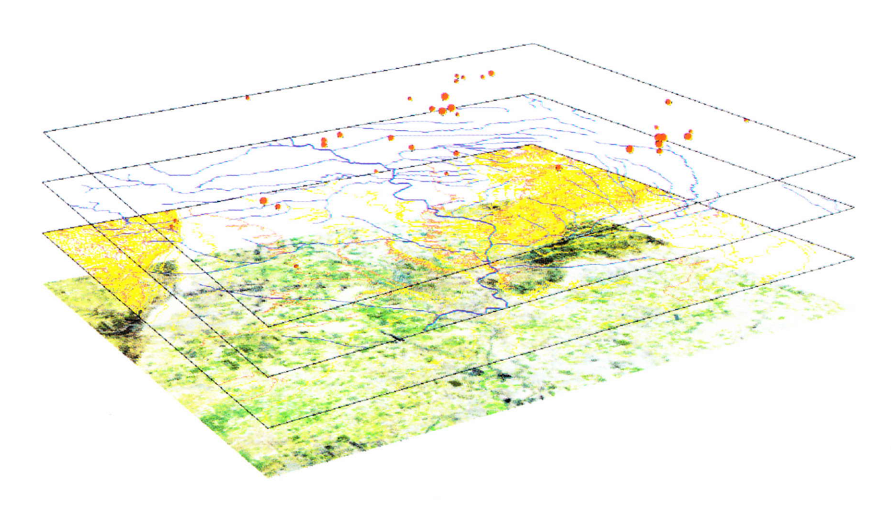




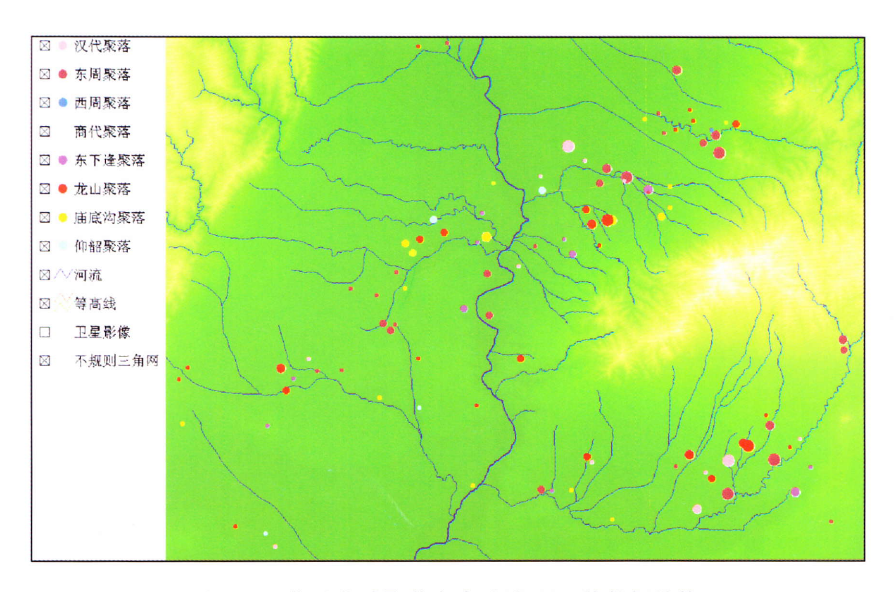
彩图 6　地形图进行色彩调整前后的局部效果



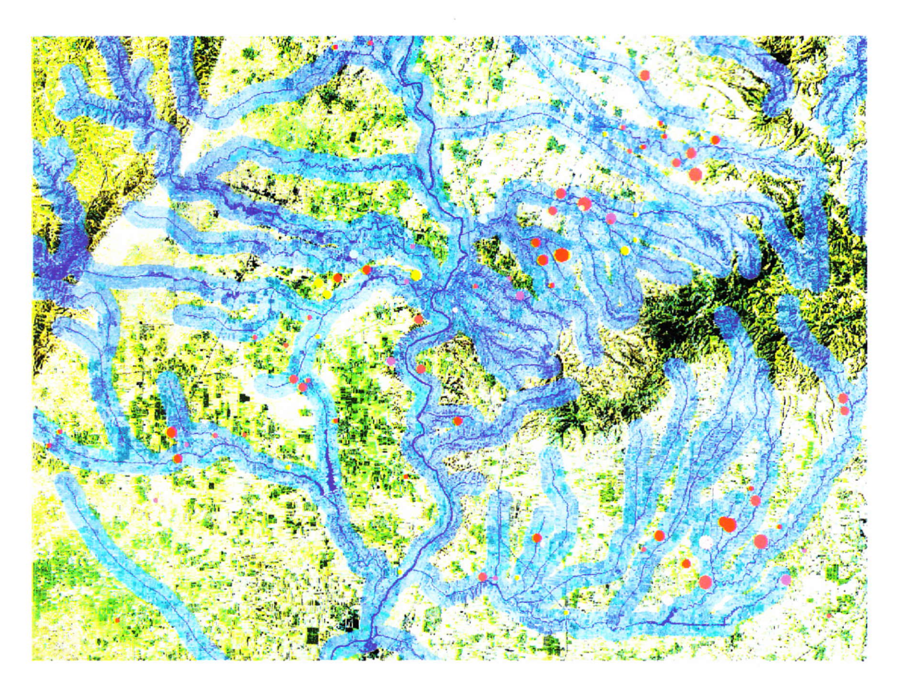
彩图 7　地形图数字化后生成的矢量要素



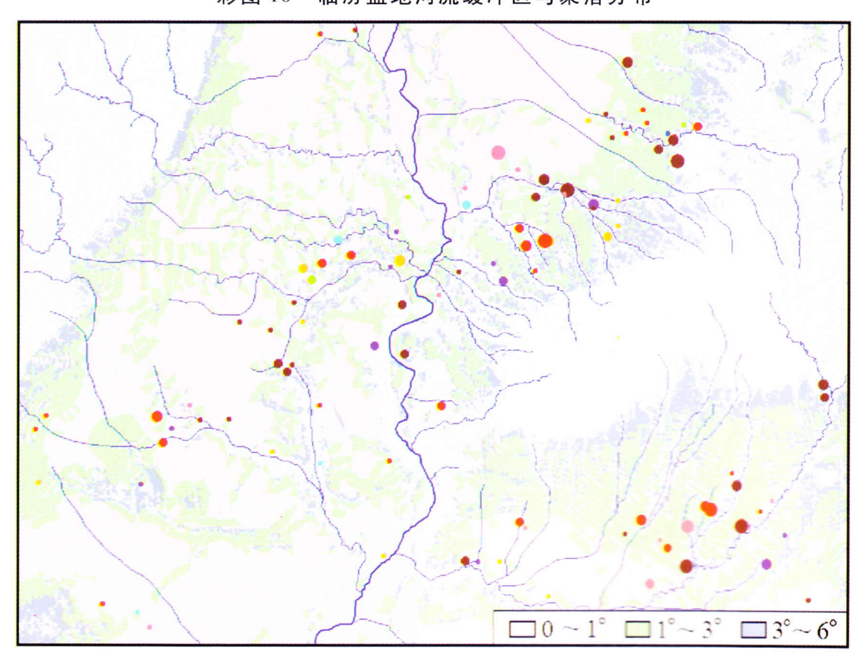
彩图 8　空间数据的叠置



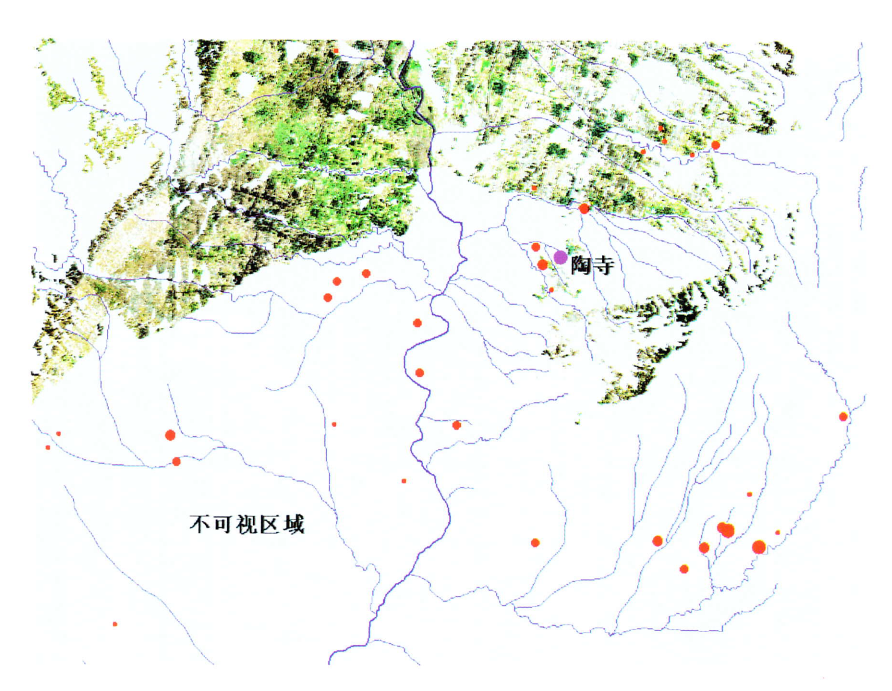
彩图 9　临汾盆地聚落考古 GIS 项目的数据结构



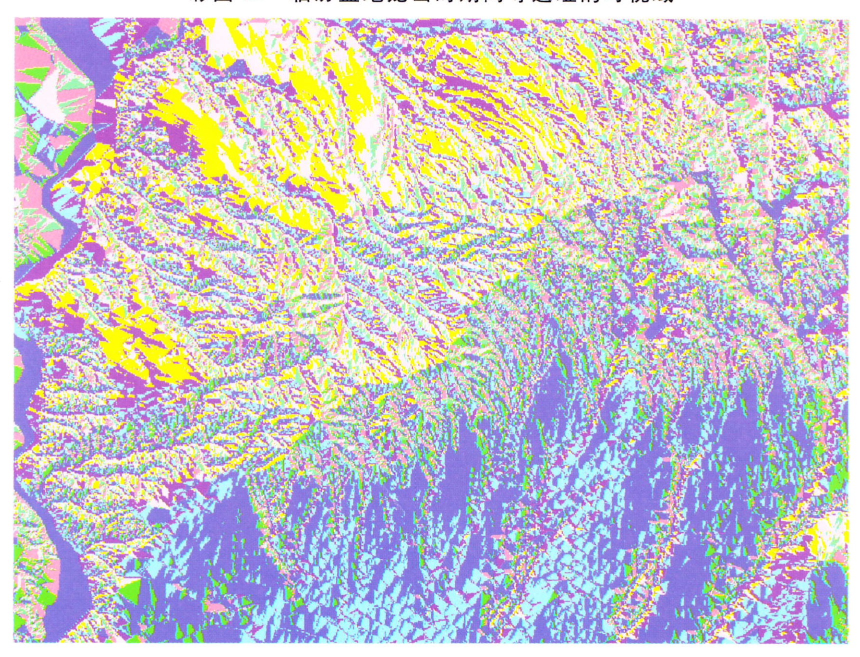
彩图 10　临汾盆地河流缓冲区与聚落分布



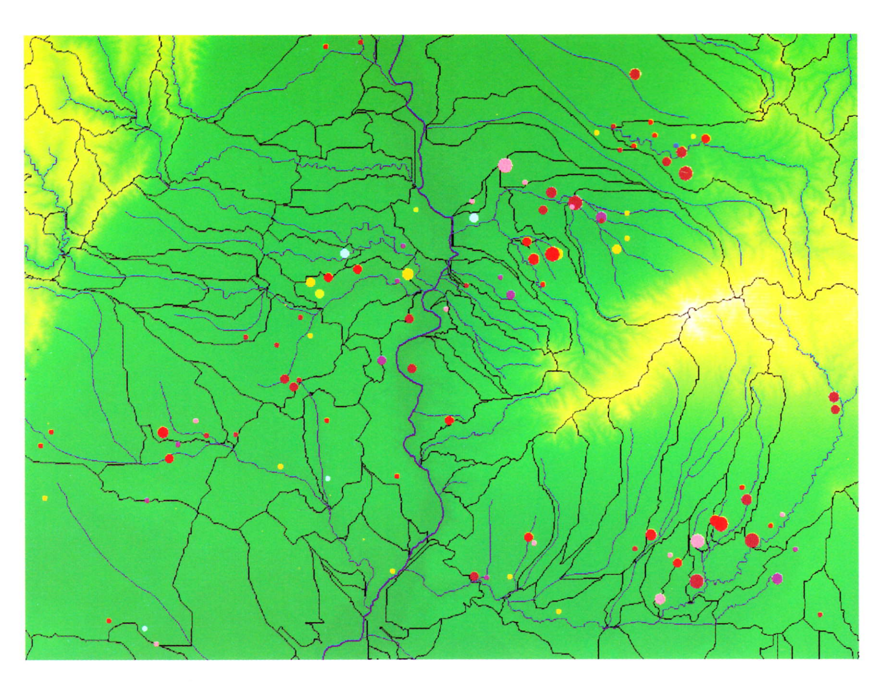
彩图 11　临汾盆地地面坡度与聚落分布



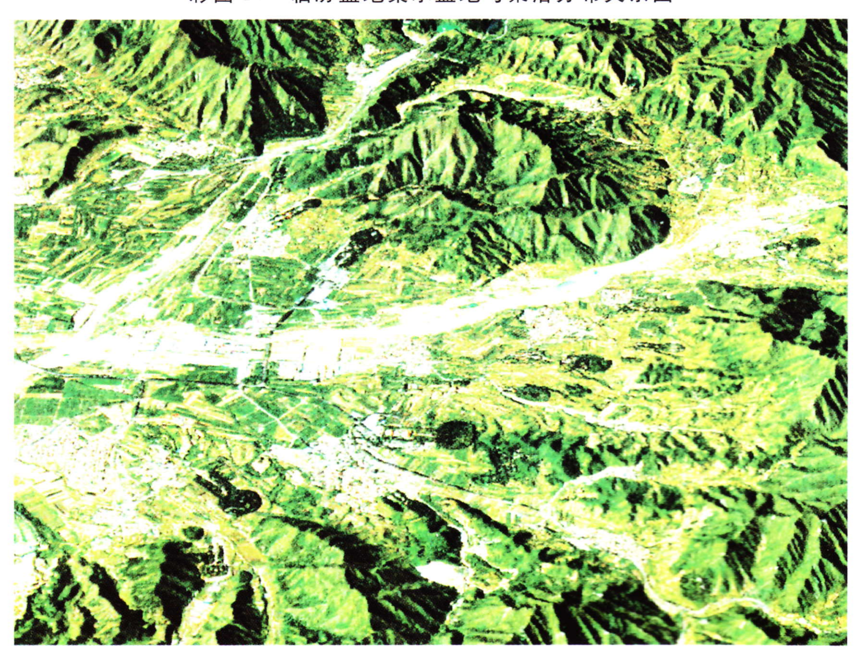
彩图 12　临汾盆地龙山时期陶寺遗址的可视域



彩图 13　临汾盆地水流方向图



彩图 14　临汾盆地集水盆地与聚落分布关系图



彩图 15　十三陵的三维影像图

目　　录

第一章 前 言

1.1 概 述

人类社会从远古走来，经历了漫长的发展过程，创造出灿烂的精神文明和物质文明。然而历史的长河深邃、悠长，人们对自身的发展过程却知之甚少，需要通过考古学研究手段，对古人遗留的文化遗产进行复原和研究，揭示古代文明发展和演变的过程。

考古学是通过考察古代人类各种活动遗留下来的实物来研究古代人类社会历史的一门科学。考古学研究就是对古代人类历史活动中残留的遗址、遗迹、遗物等进行田野调查、发掘等，测量和提取各种遗迹和器物的特征及其空间分布状况、周围环境特征等信息。然后运用多种分析手段，对获取的大量数据、资料等信息进行分析和处理，模拟和重建当时的社会、文化特征，探讨历史演变进程。

田野考古调查的基本目的是寻找和发现古代遗址，具有工作周期短、投入小、覆盖面大等优点，可以在较短时间获得大范围的考古资料，已经成为考古学研究的重要部分。田野调查中需要记录调查路线、遗址中心位置、海拔、地形和环境特征、遗址范围等空间信息。对于较为重要的遗址应该测绘遗址的地形图，在较小比例尺地形图上标注遗址的位置以及与水系等的关系，并且表现遗址的微地貌特征、文化堆积暴露的地点、遗迹遗物的分布情况、实施采集的区域和钻探位置等等。后续整理时还需要绘制一些采集的典型器物图形。

考古发掘的最终要求是能够利用发掘资料复原出遗址的形成过程，但受到发掘时技术水平和认识程度的制约，任何一项发掘都可以说是对遗址的破坏，很多空间信息都会随着发掘的进行而消失。所以考古发掘现场空间信息的提取就显得尤为重要，一般都需要测绘遗址地形图、发掘区总平面图、层面图、探方平面图、探方地层剖面图、单项遗迹图、遗迹细部图、遗物图等等，以便精确记录各种遗迹和遗物的位置和形状，弥补文字记录的一些不足之处。

鉴于考古调查和发掘中对空间信息技术的大量需求，很多国家的考古机构都采取相应的方式，记录各种空间数据。日本学者在发掘考古遗址前都会进行控制测量，在统一的坐标系统中对发掘区进行探方布设，然后在整个发掘过程中利用测量控制系统对随时出现的各种遗迹和现象进行空间信息采集。正是由于日本学者在考古发掘时进行了精确的测量控制，一些遗址中经常会在多年之后对同一个探方进行第二次甚至多次发掘。

2000 年，瑞典国家遗产部考古发掘局研发了数字田野考古建档系统 Intrasis，各种考古发掘信息都可以存入这个基于地理信息系统（GIS）的数据库之中。针对不同考古发掘计划往往需要不同的数据库，Intrasis 系统一般提供几个不同的数据库模板，以备考古学家根据研究项目的需求来进行选择。根据全站仪或 GPS 测量每个遗迹点的精确坐标，测量的数据可以自动转换并输入到 Intrasis 的遗址数据库之中，并且能够生成图形文件。田野工作中的各种数据、研究资料和计算结果数据都可以输入到 Intrasis 中，全部数据整合在一起就有可能进行 GIS 分析，开展多学科的研究，了解遗迹特征，揭示遗物内涵，实现预期的考古学研究目标。

我国考古调查和发掘中传统的资料信息收集、记录主要依赖简易工具测量、手工绘图和记录，由于因人而异，详略不同，标准很难一致。加之人员更替等原因，同一遗址的不同时期、不同发掘者经手的资料之间往往缺乏必要的连贯性和整体性，显得支离破碎，难以整合。探方的布设与遗迹绘图往往只是使用皮尺等简单测量工具来完成，成图的精度很低，几何变形严重，参与考古发掘的人员几个月后往往很难找到上次发掘探方的具体位置。现在国内很多考古队虽然配备了电子全站仪等先进设备，能够采集精确的点位坐标，但电子全站仪的操作和使用很不规范，数据处理方式落后，不能满足现代考古学研究的需要。而且现在考古研究中很少应用其他先进的测绘技术和设备，很多空间信息不能及时提取，造成极大的信息资源浪费。同时数据之间的检索与查询极为不便，多重信息不能进行空间分析、三维模拟和集成研究，数据的利用率很低。为此，如何更好地将多重空间信息技术有机地集成到考古学研究和文化遗产保护中便具有重要意义。

1.2 考古中测绘、遥感与地理信息系统的集成

1.2.1 测绘技术

测绘技术是信息产业中的重要组成部分，在文物考古工作中同样具有重要的地位。测绘技术的分支学科很多，涉及面较为广泛，考古工作中主要运用其中的电子全站仪测绘、卫星定位技术和数字摄影测量等技术。

电子全站仪是近年普遍使用的一种新型测量仪器，能够方便、快捷地进行高精度的角度、距离、高程、坐标等测量，能够满足各种文物考古测绘工作的需要，并可以与电子计算机联机作业，配合相应的测量软件，自动将电子全站仪测量数据传输到计算机中进行成图。测量的图形能够根据需要以多种形式和多种比例尺打印输出，还能够输入到地理信息系统中作为基本数据底图使用。

卫星定位系统是以人造卫星网为基础的无线电导航定位系统，一般包括空间卫星系部分、地面控制部分和用户接收部分。卫星定位系统通过空间卫星向地面接受设备发送特殊定位信息的无线电信号来实现定位测量工作，地球上任何地点和任何时刻，能同时接收到至少4颗全球定位系统的卫星发出的信号，达到连续定位的要求。

摄影测量技术能够建立数字高程模型（DEM），并由数字高程模型提取等高线和制作正射影像图，进而可以生成三维影像图，进行多图像的无缝拼接。这项技术能够对遗址、发掘区域、石刻、造像、古建筑乃至器物进行测绘，提供地面或石刻、造像、古建筑立面的各种线划图、高程模型、正射影像图和三维影像图等产品，满足各种文物考古工作的需要。

伴随着测绘设备和技术的更新，测绘成果也由单一的线划图发展到数字线划图、数字栅格图、数字正射影像图、数字地面模型等多种品种并存。为考古学研究和文物保护工作信息化进程提供有力的支持。

1.2.2 遥感技术

遥感技术是运用计算机图形图像处理技术，对考古遗址的遥感影像进行增强、处理和分析，判定遗迹或现象的位置、形状、深度等特征，

进行遗址探查、测量、三维建模等工作，为考古勘探和研究提供重要线索。遥感数据处理中的影像纠正技术，还能够用于石窟、古建筑以及文物影像的纠正，得到相应的正射影像图。

考古遗址的遥感影像中包含有丰富的地面信息，通过对其中植被、水体、土壤、岩石等图案特征的分析，可判读出地面或浅表地层中的遗迹情况。这是因为遗迹与其周围环境土壤等在结构方面的差异，导致土壤色泽与含水量的差异、植被生长分布异常、土壤侵蚀差异、特殊的微地貌特征等等，它们在遥感影像中都会以特定的图案显示出来，形成考古遗迹的影像标志，为遥感影像的解译提供了依据。

遥感影像的视野开阔，信息丰富，资料规范，适合于计算机的分析和处理，具有速度快、周期短、方法灵活等特点。

1.2.3　地理信息系统技术

考古调查和发掘中获得的资料都具有空间属性，一个考古遗址的位置和范围可以使用空间数据来表示，考古遗址内的遗迹、现象乃至一件器物或陶片也都可以用准确的数据来表示各自的空间位置。GIS 技术正是从考古遗迹或现象的空间位置出发，建立多重空间信息与属性信息并存的数据库和图形图像库，从而能够方便地进行分层或综合显示、查询、模拟各类数据信息，直观、简洁地复原当时的社会状况。

GIS 技术具有空间信息显示和查询、图文互访、修改编辑、图形图像生成与输出、多重数据的访问和显示等功能，同时还具有多重空间分析功能，特别是在区域考古研究中，可以分析一个完整区域中考古聚落的分布与演变特征，探究古人与自然环境之间的依赖与改造关系。

1.2.4　考古中测绘、遥感与地理信息系统的集成

考古研究中测绘、遥感与地理信息系统三者集成运用，构成整体、实时和动态的观测、分析和应用运行系统。在三者的集成中，测绘、遥感和地理信息系统分别充当不同的角色，相互依存，互为补充，提高了考古资料的精度和利用效率。

遥感技术能够接收高分辨率、高光谱、高时相的遥感影像，对考古遗址进行数字摄影测量，勘探地下未知遗迹，实时掌握考古遗址及其周边环境的变化特征，是信息提取与分析的主要手段，为 GIS 数据的动态更新和综合分析提供保障。遥感能够及时、正确、综合和大范围地为

GIS 提供各种数据,增加考古 GIS 的活力和应用深度,掌握考古遗址随季节的信息变化特征。在区域考古调查与研究中,遥感技术能够迅速获取整个区域的多种遥感影像资料,展示古代聚落与周围环境因素的依存关系。

测绘技术能够获取考古遗迹精确的空间位置数据,与遥感技术获取的数据既具有各自独立的功能,又能够互相补充和完善。测量所得的地面点位坐标数据,能够作为遥感影像的地面控制点信息,对遥感影像进行精确的几何校正与配准,为遥感数据实时、快速地进入 GIS 系统提供了可能,保证考古遗址的遥感数据与地面监测、调查等数据能够动态地配准、动态地进入考古 GIS 数据库。地面测绘获取的地形数据和地学编码信息,以及考古遗迹边界等的测绘数据,输入 GIS 之后可以进行面积、距离的计算,获取不同剖面的图形,进行空间分析与模拟。

GIS 是三者技术的核心和灵魂,能够将遥感的栅格数据与测绘等生成的矢量数据进行空间叠置,具有对多重信息进行存储、检索、分析、模拟、输出等功能,提高了遥感与测绘等数据分析功能和分析精度,实现技术集成的最终功能。

考古测绘、遥感与地理信息系统技术的集成是当前空间信息技术与考古学研究、遗产保护等领域发展的必然趋势,是文化遗产中空间数据采集、更新、处理、分析与研究的强大技术支持体系,能够确保快速准确地获取文化遗产的信息,对数据进行动态更新,产生工作中所需的各种图件,最终提出决策实施方案。

第二章　地形图测图总论

2.1　测量学概述

测量学是研究测定和推算地面点的几何位置、地球形状及地球重力场，据此测量地球表面自然形态和人工设施的几何分布，并结合某些生活信息和自然信息的地理分布，编制全球和局部地区各种比例尺地图的理论和技术的学科。它包括测量和制图两项主要内容，也称为测绘学。测量学是以地球表面为研究对象，为人们提供地表形态和地貌信息的一门应用科学，测量学的研究内容主要包括以下几个方面。

2.1.1　大地测量学

研究测定地球表面较大范围甚至整个地球的形状及地球重力场，地球椭球参数，以及地面点几何位置的理论和方法，分为常规大地测量学和卫星大地测量学。测量学首先要研究和测定地球的形状、大小及其重力场，并在此基础上建立一个统一的坐标系统，用以表示地表任一点在地球上的准确几何位置。地球的外形非常近似于一个椭球，在测绘学中即用一个同地球外形极为接近的旋转椭球来代表地球，称为地球椭球。地面上任一点的几何位置即用这点在地球椭球面上的经纬度和点的高程表示。

2.1.2　普通测量学

研究地球表面局部区域内测量工作的基本理论、仪器和方法的学科，是测量学的基础部分。局部区域是指在该区域内进行测量、计算和制图时，可以不顾及地球的曲率，把该区域内的地面简单地当作平面处理，而不致影响测图的精度。有了大量地面点的平面坐标和高程，就能以此为基础进行地表形态的测绘工作。其中包括地表的各种自然形态，如水系、地貌、土壤和植被的分布；也包括人类社会活动所产生的各种人工形态，如境界线、居民地、交通线和各种建筑物的位置。

普通测量学研究的主要内容,是局部区域内的控制测量和地形图测绘。基本工作包括角度测量、距离测量、高程测量和地形图测绘。此外,应用普通测量学的方法、技术和仪器还可进行考古发掘前探方布设等工作。

2.1.3 摄影测量学

利用光学摄影机摄得的像片,研究确定被摄物体的形状、大小和位置的理论与技术的一门学科。随着遥感技术的发展,摄影测量学的定义应该为:根据摄影像片和各种传感器从宇宙空间对地面进行遥感(可见光、红外和微波等辐射能)所得的各种图像记录,研究对其进行处理、量测和判读的理论和方法,以确定物体的形状、大小、性质、位置及其环境的可靠信息的一门科学。

摄影测量学以前主要用于测绘地形图,即根据从地面上或空中摄站摄得的地表影像进行量测,以获得地物、地貌或解决工程建设中的某些问题。随着科学技术特别是遥感技术的发展,摄影方式和研究对象日趋多样,摄影测量已经在许多领域得到应用。从本质上说,摄影测量学是一门以影像(图像)计算与判读为基础的信息采集与处理的科学。

摄影测量的作业方式一般为立体摄影测量,其中包括模拟式、解析式和数字式三种。模拟式是依据摄影过程中几何反转的原理,按人工立体效应的要求,利用立体像对在仪器上经过相对定向和绝对定向建立起立体几何模式,然后对其进行测量,勾绘等值线,以获得点位坐标X、Y、Z和等值线图等成果。解析式是采用模拟式测量的原理,运用解析测图仪,在计算机的配合下完成立体摄影测量工作。数字式则是运用立体摄影测量软件,在计算机中采用数字影像相关技术来实现立体量测和等值线勾绘。

2.1.4 工程测量学

各项经济建设和国防工程建设的规划设计、施工和部分建筑物建成后的运营管理中,都需要一定的测绘资料或利用测绘手段来指导工程的进行,监测建筑物的变形。这些测绘工作往往要根据具体工程的要求,采取专门的测量方法,有时需要特定的高精密度或使用特种测量仪器。

2.1.5 海洋测绘学

在海洋环境中进行的测绘工作，同陆地测量有很大的区别。测量工作主要在船上进行，并且大多采用声学或无线电方法。所以，海面上的定位、海底控制网的建立、海面形态和海底地形测量、海洋重力测量以及海图编制等都不同于陆地的同类工作。此外，海图同陆地的地图在用途上也不尽相同。

2.1.6 地图制图学

研究地图投影、地图编制、地图整饰和地图制印等项工作的理论和技术。它研究用地图图形反映自然界和人类社会各种现象的空间分布、相互联系及其动态变化。测图过程所得到的成果只是地形原图或海图的原图，还要经过编绘、整饰和制印，或增加某些专门要素，才能形成各种比例尺的地形图或海图以及各种专题地图。

2.1.7 测量学发展概况

测量学有着悠久的历史。古代测绘技术起源于水利和农业。古埃及尼罗河每年洪水泛滥，淹没了土地界线，水退以后需要划界，从而开始了测量工作。中国司马迁在《史记·夏本纪》中叙述禹受命治理洪水的情况："左准绳，右规矩，载四时，以开九州、通九道、陂九泽、度九山"。说明在公元前很久，中国人为了治水，已经开始使用简单的测量工具。17 世纪之前，人们使用简单的工具，如中国的测绳、矩尺和圭表等进行测量。约 1730 年，制成了第一架经纬仪，大大促进了三角测量的发展。18 世纪又发明了时钟，解决了经度测定的问题。19 世纪中叶创立了摄影测量方法，出现了立体坐标量测仪。到 20 世纪初，发展了航空摄影测量的方法，野外的部分测量工作转移到室内完成；60 年代以后，测绘仪器的电子化和自动化以及多种空间技术的出现，实现了作业的电算化和自动化，提高了测绘成果的质量和精度。特别是近二十年来，电子水准仪、电子经纬仪、电子全站仪、自动绘图仪以及卫星定位系统(SPS)和数字摄影测量等技术的发展，使传统的测绘学理论和方法发生了巨大的变革，测绘的对象由地球扩展到月球和其他星球，测绘的成果也由单一的线划图发展到数字线划图(DLG)、数字栅格图(DRG)、数字正射影像图(DOM)、数字高程模型(DEM)(4D 产品)等

多种品种并存。

2.2 地球的形状与大小

测量学的主要研究对象是地球自然表面,地球自然表面有着众多的高山、丘陵、平原、湖泊、海洋等起伏形态,是一个形状极为复杂的曲面。地球上海洋面积约占总面积的71%,可以说海水的形状表现了地球的基本形状,而且大陆的最高山峰(我国珠穆朗玛峰)高出海水面8844米,最深的海沟(太平洋西部的马里亚纳海沟南端)低于海水面11034米,它们与地球半径6300多公里相比,分别相当于地球半径的1.5‰和1.8‰,所以能够简单地定义地球的形状,建立起测量的基准面。在测量学中,设想完全处于静止状态的平均海水面,向大陆下延伸所形成的一个封闭曲面,称为大地水准面,它所围成的形体称为大地体,用来近似表示地球的形状。

由于地球外壳物质分布不均匀以及地面起伏等因素的影响,重力方向常发生局部性的变化,大地水准面也随之产生微小的起伏,成为一个不规则的曲面,如果将地球表面上的点投影到这样的不规则曲面上,计算起来仍然非常困难。因此必须用一个与大地水准面极为近似、并可以用数学公式表示的规则球面来代替,这个规则球面的球体称为地球椭球体(图2.1)。

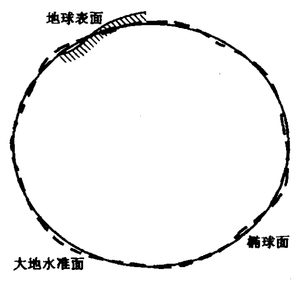


图2.1 地球表面与大地水准面

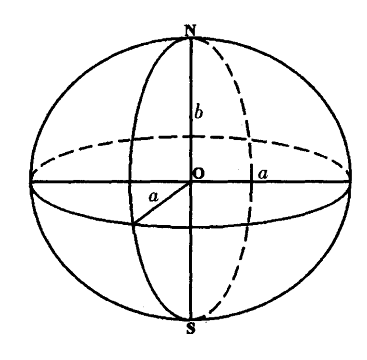


图2.2 地球椭球体

椭球体是围绕椭圆的短轴NS旋转而成的(图2.2),经过旋转轴NS的平面与椭球面相截的曲线是一个椭圆,垂直于旋转轴的平面与椭球面相截的曲线是一个圆。决定地球椭球体的形状和大小的参数为长半轴

a 和短半轴 b,以及由此计算出的另一参数:

$$扁率 f = \frac{a-b}{a}$$

由于参考椭球体的扁率很小,当测区面积较小时,在一些测量工作的计算中可以把地球当作圆球看待,其半径为:$R = \frac{1}{3}(2a+b) = 6371$ 公里。

我国目前所采用的参考椭球体为1980年国家大地测量参考系,其中长半轴 $a = 6378140$ 米,短半轴 $b = 6356755.3$ 米,扁率 $f = 1:298.257$。

2.3 地面点位的确定

地面点的位置用坐标法确定。测量学中常常把地球自然面上的点沿铅垂线方向投影到椭球面上,并在椭球球面上建立坐标系统来确定它们的位置;再确定地面点到大地水准面的铅垂距离,即地面点高程。

2.3.1 天文地理坐标系

在图2.3中,O为椭球球心,NS为椭球的旋转轴,旋转轴与球面的交点为北极N和南极S。通过椭球的旋转轴可作无数个平面,每一个平面都称为子午面,子午面与球面的交线称子午线。其中通过原格林尼治天文台的子午面为起始子午面,天文经度向东西计算,由0°到180°,起始子午面以东称为东经,以西称为西经。A点的天文经度 λ 就是通过该点及其铅垂线的子午面与起始子午面的夹角。同时,垂直于椭球旋转轴也可作无数个平面,它们与椭球面的交线称为平行圈或纬线,其中过球心的垂直面称为赤道面,赤道面与球面的交线称赤道。天文纬度是以赤道面为纬度起始面,向两极计,由0°到90°,赤道以南称为南纬,以北称为北纬。A点的天文纬度 φ 是过A点的铅垂线与赤道面之间的交角。天文地理坐标可以在地面点上通过天文测量的方法测定。

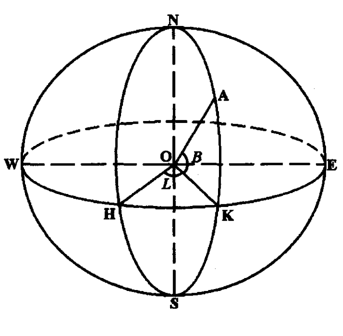


图2.3 地理坐标系

2.3.2 大地地理坐标系

在测量学中,点在椭球面上的位置用大地坐标即大地经度 L 和大地纬度 B 表示。图 2.3 中 A 点的大地坐标根据 A 点的椭球面法线确定,即在椭球面上的 A 点作一与椭球相切的平面,再过 A 点作一垂直于该平面的直线,这条直线称为 A 点的椭球面法线。A 点大地经度 L 就是通过 A 点的法线及椭球旋转轴的子午面与起始子午面的夹角;大地纬度 B 就是 A 点的椭球面法线与赤道面的交角。大地经纬度根据一个起始的大地点(称为大地原点,该点的大地经纬度与天文经纬度相一致)的大地坐标,按大地测量结果的数据推算得到。

由于天文坐标和大地坐标选用的基准线、基准面不同,所以同一点的天文坐标与大地坐标不一样,同一点的垂线和法线也不一致,因而产生垂线偏差。采用不同的椭球时,大地坐标也不一样。

2.3.3 球心坐标系

随着卫星大地测量的发展,需要使用球心空间直角坐标系来表示空间一点的位置。这种坐标系的原点设在椭球的中心,x、y 轴在椭球的赤道面内,而且 x 轴通过起始子午面,z 轴与椭球旋转轴一致(图 2.4)。所以地球上任意一点 A 点的空间位置都可以用三维直角坐标 x_A,y_A,z_A 表示。

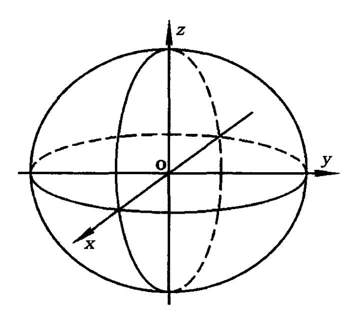


图 2.4　球心坐标系

卫星定位系统一般是采用球心坐标系,即 WGS-84(World Geodetic System 1984)坐标系,是世界大地坐标系统,其坐标原点在地心,采用 WGS-84 椭球。

2.3.4 高斯平面直角坐标系

采用球心坐标系或地理坐标系确定的点位一般适用于少数高级控制点,而对于大量的地面点位来说则显得很不直观,而且计算极为不便,测量的计算和绘图最好是在平面上进行。但是地球表面是一个不可展开的曲面,球面上的点需要通过地图投影的方法化算到平面上。地图投影的方法很多,我国采用高斯地图投影的方法。

高斯投影的方法首先是把地球按经线划分成带，称为投影带，每隔6°(或3°、1.5°)划为一带，自西向东将整个地球划分成60个带，带号从起始子午线开始，用阿拉伯数字表示，位于各带中央的子午线称为该带的中央子午线，任意一带中央子午线的经度 L_0 可按下式计算：

$$L_0 = 6n - 3$$

式中 n 为投影带带号。6°带的带号、中央子午线及其经度情况如图2.5所示。

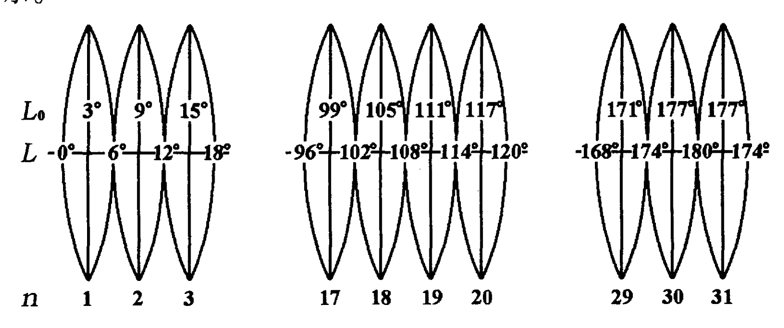


图2.5　6°投影带的带号、中央子午线及其经度

进行高斯投影时，设想用一个圆柱面呈外切状态套在地球上，并规定圆柱面的中心轴与赤道面重合，圆柱面与地球的交线为某一条中央子午线，将地球这一投影带内的图形(距离、角度等)按照一定的数学关系投影到横圆柱面上，然后将横圆柱面沿母线展开成平面，就得到投影面上的相应平面图形(图2.6)。在这个平面上，中央子午线与赤道的投影成为相互垂直的两条直线，分别作为高斯平面直角坐标系的纵轴(x 轴)和横轴(y 轴)，两轴的交点 O 作为坐标的原点，同时规定 x 轴向北为正，y 轴向东为正(如图2.7 a所示)。

我国位于北半球，境内 x 坐标值均为正数，y 坐标值则有正有负，为了计算方便，将每个投影带的坐标原点向西平移500公里，使整个投影带中任意一点的横坐标 y 都为正值(如图2.7 b所示)。而且为了区分不同的6°投影带内的横坐标值，还在横坐标值前面加上带号。例如某点的横坐标值为16362850米，表示该点位于16号投影带内，位于中央子午线以西500000 - 362850 = 137150米。

在高斯投影中，离中央子午线越远的点变形越大，为了控制变形，有时采用3°带甚至1.5°带进行投影。

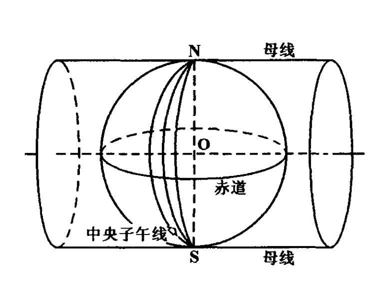


图 2.6　高斯投影原理

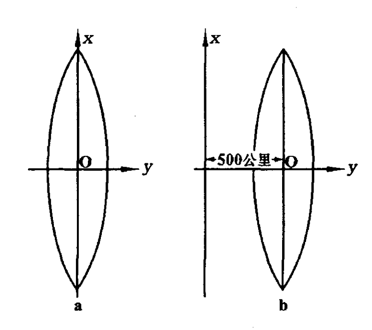


图 2.7　高斯平面直角坐标系

2.3.5　我国目前常用的大地坐标系

2.3.5.1　1954 年北京坐标系

我国 20 世纪 50 年代采用克拉索夫斯基椭球建立的坐标系是参考坐标系。由于大地原点在前苏联,便利用我国东北边境呼玛、吉拉林、东宁三个点与苏联大地网联测后的坐标作为我国天文大地网起算数据,然后通过天文大地网坐标计算,推算出北京一点的坐标,故命名为 1954 年北京坐标系。后来使用这个坐标系进行了大量测绘工作,现在使用的很多地形图都属于 1954 年北京坐标系。但是这个坐标系存在一些诸如参考椭球长半轴偏长,椭球基准轴定向不明确,椭球面与我国境内的大地水准面不太吻合,点位精度不高等问题。

2.3.5.2　1980 国家大地坐标系(也称为 1980 西安坐标系)

为了克服 1954 年北京坐标系存在的问题,充分发挥我国原有天文大地网的潜在精度,于 20 世纪 70 年代末,对原大地网重新进行平差,大地原点选在陕西省永乐镇,椭球面与我国境内的大地水准面密合最佳。平差后,其大地水准面与椭球面差距在 ±20 米之内,边长精度为 1∶500000。

2.3.5.3　2000 国家大地坐标系

面对空间技术、信息技术等的迅猛发展和广泛普及,我国需要一个以全球参考基准框架为背景的、全国统一的坐标系统来处理国家、区域、海洋与全球化的资源、环境、社会和信息等问题。所以国家测绘局公布自 2008 年 7 月 1 日起,使用“2000 国家大地坐标系”。

2000 国家大地坐标系是全球地心坐标系,其原点为包括海洋和大气的整个地球的质量中心,地球椭球参数的长半轴 a = 6378137 米,短

半轴 b=6356752.314062 米，扁率 f=1/298.257222101。

2.3.6 平面直角坐标系

在小区域内进行考古测量时，常把球面的投影面当作平面看待，这样就可以采用平面直角坐标系来确定地面点在投影面上的位置。测量学中的平面直角坐标系与解析几何中的平面直角坐标系基本相同，只是 x 轴与 y 轴的位置作了对调，象限编排的顺序改成了顺时针方向（如图 2.8），这是因为测量工作中以极坐标表示点位时，角度值是以北方为起始方向并按顺时针方向计算的夹角。同时，解析几何中全部的三角公式都适用于测量学中的各种计算。

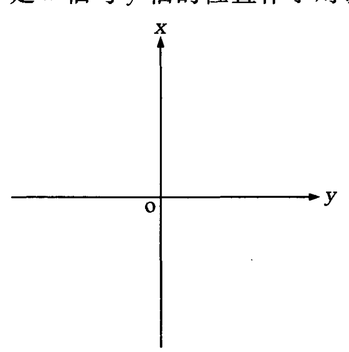


图 2.8 平面直角坐标系

要用平面直角坐标确定地面点的位置，首先要在测图平面上把直角坐标系的位置固定下来，即在平面上预先确定坐标原点的位置和坐标轴的方向。在考古测量工作中，如果附近没有国家控制点，考虑到成图面积较小，为了工作方便，可以假设坐标系的原点，即选择遗址所在地区真子午线或磁子午线为 x 轴，向北为正，坐标原点的位置设在测区（遗址）的西南角外，使测区（遗址）内的各点坐标全部为正数。

地面上一点的正北方向有两种解释，一为指向地球北极的真子午线方向（真北），可用天文观测的方法来确定；一为指向地球磁极的磁子午线方向（磁北），静止的磁针所指的方向就是磁子午线方向。在测量学中，这两种方法都被用作标定方向的依据，称之为起始方向或基本方向线。于是在决定坐标方向时就有两种方法可以采用，或者使纵坐标轴与真北方向重合，或者使纵坐标轴与磁北方向重合。

2.3.7 地面点高程

地面点沿铅垂线方向到大地水准面的距离称为高程，也称为海拔或绝对高程。大地水准面通常作为高程的起始面，所以大地水准面又称为高程基准面。一个点的高程通常以字母 H 加注脚标表示，如图 2.9 中的 A 点，其高程为 AA′，记为 H_A。

过空间任意一点，也可以作出象大地水准面那样的等位能曲面，这种曲面称为水准面。因而，地面点的高程又可定义为过该点的水准面沿铅垂线方向到大地水准面的距离。

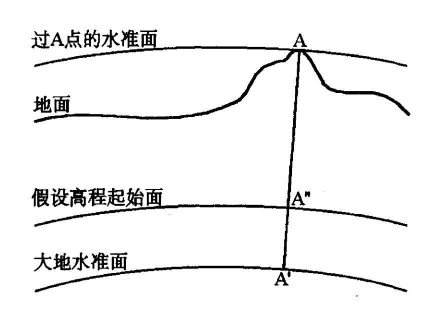


图 2.9　地面点的高程

我国的绝对高程是以青岛港验潮站 1950 年至 1956 年记录的黄海平均海水面的高度为准，推算的黄海平均海水面作为我国高程起算面，并在青岛市观象山建立了水准原点。水准原点到验潮站平均海水面高程为 72.289 米。这个高程系统称为“1956 年黄海高程系”。全国各地的高程都是依此而得到的。

20 世纪 80 年代初，国家又根据 1953 年至 1979 年青岛验潮站的观测资料，推算出新的黄海平均海水面作为高程零点。由此测得青岛水准原点高程为 72.2604 米，称为“1985 年国家高程基准”，并从 1985 年 1 月 1 日起执行新的高程基准。

有时也可以临时假定一个水准面作为高程起始面来确定地面点的高程，这种高程称为相对高程。在图 2.9 中的 A 点，相对于假定的高程起始面而言，其相对高程为 AA″。由此可以看出：点 A 的绝对高程，等于它的相对高程加假定水准面的绝对高程 A′A″。考古测量工作中经常采用相对高程来测绘考古遗址的地形图。

2.4　水平面代替水准面的限度

在单个考古遗址中进行测量时，可以用水平面直接代替水准面开展工作，将遗址范围内地球表面上的点投影到水平面上来决定其位置。现在讨论在多大范围内用平面投影来代替球面投影测量时，可以满足一定测量精度的要求。

2.4.1　水准面曲率对水平距离测量的影响

在图 2.10 中，假设大地水准面 DAE 为圆球面，AB 为该水准面上长度为 S 的一段圆弧，其所对应的圆心角为 θ，地球半径为 R。AC 为过 A 点的切线，设长度为 t，

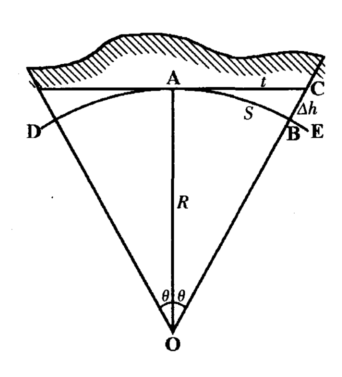


图 2.10　水准面弯曲对测量的影响

$$\Delta S = AC - AB = t - S$$

其中　$AC = t = R \cdot \mathrm{tg}\theta$

$$AB = S = R \cdot \theta$$

三角函数的级数公式：$\mathrm{tg}\theta = \theta + \frac{1}{3}\theta^3 + \frac{2}{15}\theta^5 + \cdots$

所以　$\Delta S = R\left(\frac{1}{3}\theta^3 + \frac{2}{15}\theta^5 + \cdots\right)$.

因 θ 角值很小，可以略去五次方以上的各项，并以 $\theta = \frac{S}{R}$ 代入，则得

$$\Delta S = \frac{1}{3} \cdot \frac{S^3}{R^2},$$

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{1}{3}\left(\frac{S}{R}\right)^2$$

在上式中取 $R = 6371$ 公里，则

当 $S = 5$ 公里时，　　$\Delta S/S = 1/4880000$

当 $S = 10$ 公里时，　　$\Delta S/S = 1/1217700$

当 $S = 20$ 公里时，　　$\Delta S/S = 1/304400$

由此可见，当水平距离为 10 公里时，以水平面代替水准面所产生的距离误差为距离的 1/1217700，目前最精密距离测量的容许误差为 1/100 万。所以，在半径为 10 公里的圆形范围内进行距离测量时，可以把水准面当作水平面看待，由此产生的误差可以忽略不计。

2.4.2　水准面曲率对水平角度测量的影响

在球面三角学中，同一个空间多边形在球面上投影的内角之和，较其在平面上投影的内角之和大一个球面角超 ε 的数值。其公式为

$$\varepsilon'' = \rho''\frac{P}{R^2}$$

式中，ρ''为以秒计的弧度，P 为球面多边形面积，R 为地球半径。在测量工作中实测的是球面面积，绘制成图时则绘成平面图形的面积。

当 $P = 10$ 平方公里时，$\varepsilon'' = 0.05''$

当 $P = 100$ 平方公里时，$\varepsilon'' = 0.51''$

当 $P = 400$ 平方公里时，$\varepsilon'' = 2.03''$

所以，对于面积在 100 平方公里以内的多边形，地球曲率对测量水平角度的影响只有在最精密的测量中才需要考虑，一般的测量工作中不必考虑。

2.4.3 水准面曲率（地球曲率）对高差测量的影响

由图 2.10 可得

$$(R + \Delta h)^2 = R^2 + t^2$$

$$2R \times \Delta h + (\Delta h)^2 = t^2$$

所以

$$\Delta h = \frac{t^2}{2R + \Delta h}$$

根据前文描述，在较小的范围内，两点间投影的水平距离与其在大地水准面上的弧长相差很小，可以用 S 代替 t，同时 Δh 与地球半径 R 相比可以忽略不计，因而上式又可以写成：

$$\Delta h = \frac{S^2}{2R}$$

当 $S = 100$ 米时，$\Delta h = 0.78$ 毫米

当 $S = 1$ 公里时，$\Delta h = 78$ 毫米

当 $S = 10$ 公里时，$\Delta h = 7.8$ 米

计算表明，即便在较小的范围内，地球曲率对高差测量的影响也必须加以考虑。

2.5 地图的基本概念

所谓地图，就是根据一定的数学法则，使用专门符号（包括注记和符号），经过制图综合将地球表面缩绘于平面上的图件。它能反映各种自然现象和社会现象的空间分布、联系、变化和发展。地图不仅是区域性学科调查研究成果的一种表达形式，而且是许多部门和学科赖以分析研究、量算数据、综合评价、分析预报和指挥调度等的重要资料。因此在国民经济、军事和科学研究中具有广泛的应用。

地图有数学基础、制图对象和图面整饰三个组成部分。数学基础包括大地控制点、经纬线网和比例尺。制图对象在普通地图上包括水系、地貌、居民地、交通线、土质、境界线以及其他地物；在专题地图上包

括地理底图的内容和突出表现的主题要素。图面整饰的内容包括图廓、图名、图号、图例和图面上文字说明以及附加图表等。

地图同航空像片、卫星影像、地景素描相比有三个基本特征:(1)具有一定的数学基础。即按一定的地图投影和比例尺,将地球表面上的各点转化为平面上相应的点,使图上的点位同地面上的实际物体保持对应关系,保证制图对象地理位置的准确性。(2)运用符号系统表示事物。它不仅可以表示可见物体(现象),而且还能表示不可见物体(现象)。(3)运用制图综合的方法,将地面现象的主要特征突出,次要细节舍去,并运用夸大和简化的手法,使地图内容清晰易读,符合用图要求。

地图按内容可分为普通地图和专题地图(专门地图);按比例尺可分为大比例尺图、中比例尺图、小比例尺图;按制图区域可分为世界地图、全国地图、分省地图等。

普通地图就是以同等详细的程度表示地面各种自然现象和社会经济现象的地图。这种地图比较全面地反映地面各种基本要素(水系、地貌、土质、植被、居民地、交通网、边界线、独立地物等等),它可以分为地形图和地理图。

专题地图就是突出反映某一种或某几种主题要素或现象的地图(如交通图、遗迹分布图),它也可以在普通地图的基础上着重表示某个专门要素(如地质图、气象图),可以分为自然地图和社会经济地图。其表示方法目前有范围法、质底法、符号法、等值线法、点值法和统计图法等。

平常所见的地图都是绘在纸上的,对此大家并不陌生,这种地图直观、清楚,但使用、携带并不是很方便,查询、量算、更新都很麻烦。所以随着计算机技术的发展,20 世纪 80 年代末出现了数字地图,运用计算机进行操作和查询,不存在纸质地图的缺点,在很多行业都得到广泛应用。

2.6 地形图的分幅与编号

为了便于地形图的测绘、使用和管理,需要将大面积的地形图进行统一的分幅,并且每张图必须有一定大小的图廓和一个有规律的编号。地形图的分幅可分为矩形分幅和梯形分幅两类。梯形分幅就是按一定

的经差和纬差以经纬线分别作为图幅的边界，由于经线（子午线）向南北两极收敛，由此整个图幅呈梯形。矩形分幅是以直角坐标格网线为图幅边界。

2.6.1 梯形分幅

2.6.1.1 1:100 万地形图

1:100 万地形图分幅与编号是国际统一规定的。经差 6°，由经度 180°开始，自西向东用阿拉伯数字 1 至 60 编号；纬差 4°，由赤道向两极（至 88°），用大写英文字母 A 至 V 标明，以两极为中心，纬度 88°的圆内以 Z 标明。南北半球的图幅分别在编号前加 S、N 来区别。图 2.11 为中国境内的 1:100 万比例尺地形图的分幅与编号情况。其中北京地区 1:100 万的地形图图号为 J-50。假如甲地位置在北纬 39°54′30″、东经 122°28′25″，其所在1:100万比例尺地形图的图幅编号为 J-51。

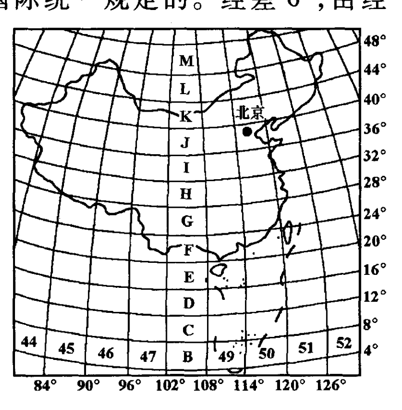


图 2.11 中国境内 1:100 万地形图分幅

2.6.1.2 1:50 万、1:20 万、1:10 万地形图

1:100 万图幅按经差 3°、纬差 2°分成 4 幅 1:50 万的图幅，并在 1:100 万图号后加以 A、B、C、D 表示（如图 2.12）。甲地所在的 1:50 万比例尺地形图的编号为 J-51-A。

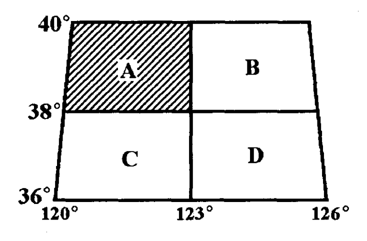


图 2.12 1:50 万地形图分幅

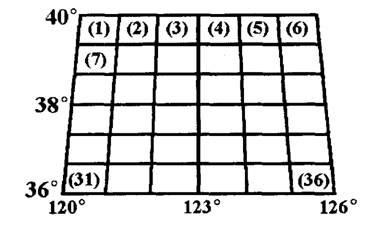


图 2.13 1:20 万地形图分幅

1:100 万图幅按经差 1°、纬差 40 分分成 36 幅 1:20 万的图幅，依次在 1:100 万图号后加以（01）、（02）至（36）表示。如图 2.13 中甲地所在

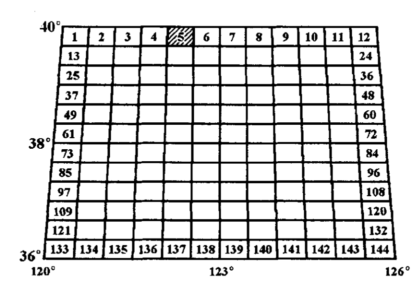


图 2.14　1:10 万地形图分幅

的 1:20 万比例尺地形图的编号为 J-51-(03)。

1:100 万图幅按经差 30 分、纬差 20 分分成 144 幅 1:10 万的图幅，其编号是在 1:100 万比例尺的图幅编号后面依次加以 001、002 至 144 表示。如图 2.14 中甲地所在的 1:10 万比例尺地形图的编号为 J-51-005 。

2.6.1.3　1:5 万、1:2.5 万、1:1 万地形图

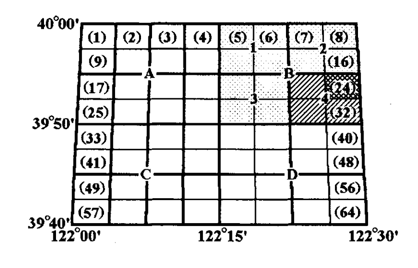


图 2.15　1:5 万、1:2.5 万、1:1 万地形图分幅

1954 年北京坐标系 1:5 万地形图图幅编号，是将 1:10 万图幅分成 4 幅 1:5 万的图幅，分别以 A、B、C、D 表示，其编号是在 1:10 万比例尺的编号后加上各自的代号，如图 2.15 中的 1:5 万地形图图幅编号为 J-51-005-B。

1:5 万图幅分成 4 幅 1:2.5 万的图幅，加以 1、2、3、4 表示。1:10万图幅分成 8 行、8 列共 64 幅 1:1 万的图幅，编号加(01)、(02)至(64)来表示。如图 2.15 中的 1:1 万地形图图幅编号为 J-51-005-(24)。

2.6.1.4　1:5000 和 1:2000 地形图

1:1 万图幅分成 4 幅1:5000的图幅，编号加 a、b、c、d 表示。1:5000图幅分成 9 幅 1:2000 图幅，编号加 1、2 至 9 表示。如甲地所在的 1:2000比例尺地形图的编号为 J-51-005-(24)-b-4 。

1954 年北京坐标系地形图的图号中所有数字前面都是没有“0”的，现在为了计算机存储和检索方便，需要使相同比例尺的地形图图号的字符长度相同，所以有的数字前面加“0”。

知道某地的经纬度之后，即可以计算出该地所在各种比例尺地形图的图幅编号，现在可以使用一些小软件进行计算。测绘部门为了便于实际工作，印制了 1:600 万和 1:400 万等比例尺的图幅接合表，查询图号和简单标注等工作变得极为方便。

1980 西安坐标系图幅编号与 1954 年北京坐标系的图幅编号不

同,是以 1:100 万图幅为基础,将每幅百万比例尺的图幅均匀分成一定的行和列,由 1:100 万比例尺图幅编号,加比例尺代码和所在图幅的行列号组成(表 2.1)。

表 2.1 新图幅不同比例尺的图幅关系

比例尺		1:100 万	1:50 万	1:25 万	1:10 万	1:5 万	1:2.5 万	1:1 万	1:5000
图幅范围	经差	6°	3°	1°30′	30′	15′	7′30″	3′45″	1′52.5″
	纬差	4°	2°	1°	20′	10′	5′	2′30″	1′15″
行列数量关系	行数	1	2	4	12	24	48	96	192
	列数	1	2	4	12	24	48	96	192
比例尺代码			B	C	D	E	F	G	H
不同比例尺的图幅数量关系	1:100 万	1	4	16	144	576	2 304	9 216	36 864
	1:50 万		1	4	36	144	576	2 304	9 216
	1:25 万			1	9	36	144	576	2 304
	1:10 万				1	4	16	64	576
	1:5 万					1	4	16	64
	1:2.5 万						1	4	16
	1:1 万							1	4

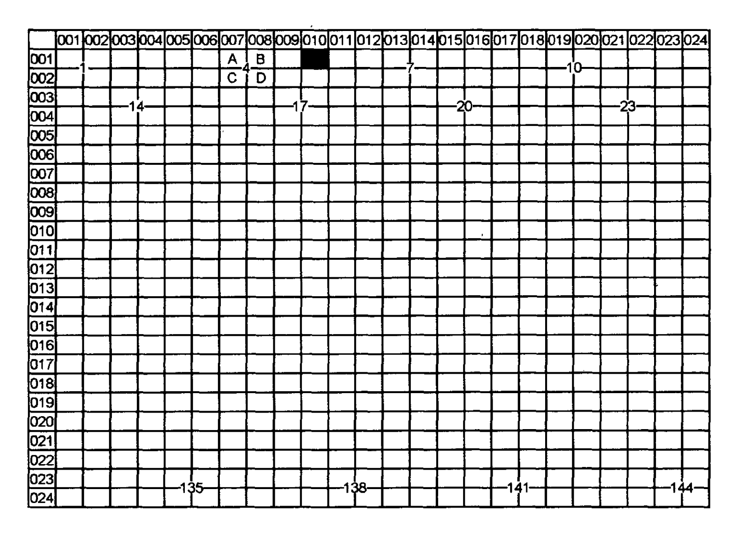


图 2.16 1:5 万地形图两种分幅编号方法对照图

例如，如果一幅地形图的标准编号为J 51 E 001 010，其中“J 51”为1:100万图幅编号，“E”为1:5万地形图比例尺代码，“001”为该图幅所在的行号，“010”为该图幅所在的列号。1:5万地形图两种分幅编号方法的对照图如图2.16所示。

2.6.2 矩形分幅

1:1000和1:500等大比例尺的地形图通常采用矩形分幅，1:2000和1:5000的地形图有时也采用矩形分幅。一般规定在1:5000比例尺测图时采用纵、横坐标各40厘米（实地为2公里）的分幅，图幅内分16小格，每小格的边长为10厘米。1:2000、1:1000和1:500比例尺的图幅纵、横各50厘米，每幅分25小格，每小格的边长为10厘米，分幅时以整公里（或百米）坐标为图幅边界。考古遗址测量时，为了减少图幅和接边，一般是根据遗址的形状，采用任意分幅将图形控制在一个图幅范围内。

矩形分幅的图号都采用该图廓西南角的坐标以公里为单位来表示，如83 + 15 。考古遗址地形图的图号可以根据遗址的名称来命名，如张家坡遗址地形图。

2.7 地形图的内容

凡是图上既表示出道路、河流、居民地等一系列固定物体的平面位置，又表示出各种高低起伏形态，并经过综合取舍，按比例缩小后用规定的符号和一定的表示方法描绘在图纸上的正射投影图，都可称为地形图。正投影（也称为等角投影）是将地面点沿铅垂线方向投影到投影面上，并使投影前后图形的角度保持不变。

2.7.1 地形图的内容

地形图四周一般有图框，图框的方向通常表示为上北、下南、左西、右东，特殊情况应在图上绘出指北的方向。图上还应有比例尺、图例、坐标系、高程系及施测日期，图中有城镇、道路等人工地物和森林、湖泊、江河等自然地物，有高山、陡坎、冲沟等地貌。图2.17是1980西安坐标系1:5万比例尺的标准分幅地形图图框及其周围的标注情况，下文对相关内容进行简单介绍。

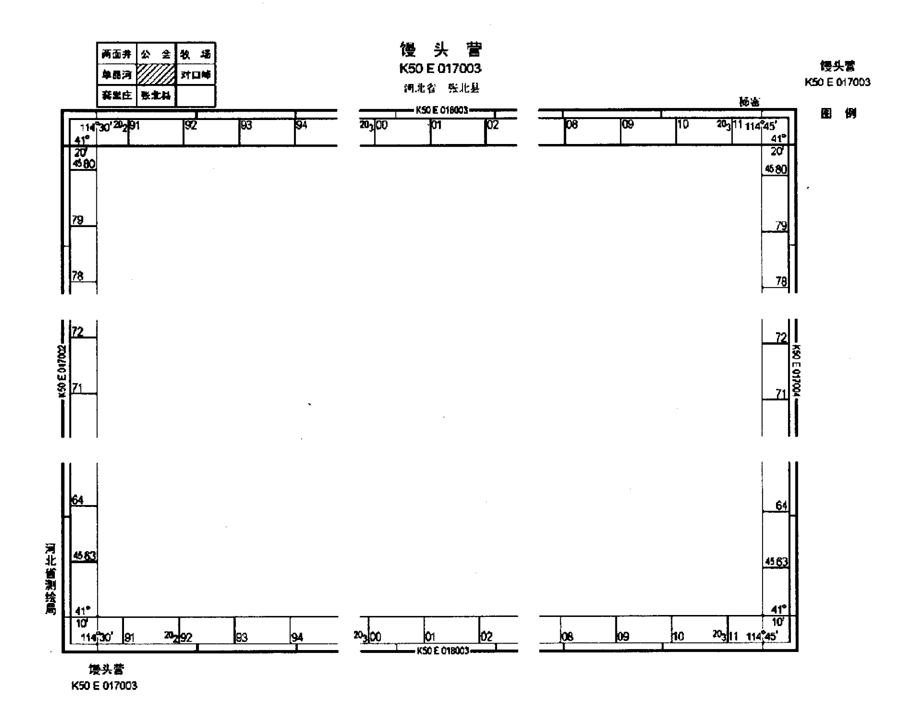


图 2.17　1:5 万地形图的图框及周边注记

1. 图框外左上方分为 9 个小格的区域为接边图,中间有斜线的小格表示本图幅,周围表示与本图幅相邻的 8 幅地形图的图名,没有图名的说明该图幅在当时尚未测绘。

2. 图框外上方正中自上而下依次为图名、图号、本图幅内的行政区划。图名与图号在图框外的左下角与右上角还有标注,主要是为了便于查阅。

3. 图框外右上角的"秘密"二字表示该地形图受国家保密法的约束,一些内容不能公开发表。

4. 图框外右侧一般是图例,表示本图幅内一些不常见符号分别表示什么地物,常用符号一般不在此区域标注。

5. 图框外左侧下部表示测绘单位的名称。

6. 图框外下部中央是本图幅的比例尺,由数字和图解两种形式表示。下部两侧有成图的时间、方式、采用的坐标系统、高程系统、等高距、地形图图式的版本号等,还有三北方向图(磁北、真北与坐标纵线

之间的夹角)、坡度尺,有时候还会有一些标注的内容。

7. 最外层图框线四边的中央是相邻四幅地形图的图号。往内粗线与细线之间的长条区域被均匀分割,表示经纬度,每小格表示 1′。1:5万地形图的经差是 15′,纬差是 10′,所以横向是 15 小格,纵向是 10 小格。每小格分成 60 等份后,每份就是 1″。根据经纬度格网可以量算地形图内任意一点的经纬度。

8. 经纬度格网再往内就是坐标格网,表示图幅内大地坐标的布局情况。1:5 万地形图的坐标格网间隔是 2 厘米,表示实地 1 公里的距离,各格网上标注的数字就是实地所在的坐标数值。其中横坐标数值的前两位表示本图幅所在投影带的带号,如图中的 20291 就表示投影带的带号是 20,东坐标的值是 291 公里。

9. 图幅中央表示各种地物与地貌要素,在比较平坦的城镇等地区,图上表现的地物很多,而较少反映地貌情况,有时为了表示地面的高低起伏,在若干点位上注明高程。在地形起伏较大的丘陵地带或山区,需要用大量的等高线来表示地面的起伏状况。

2.7.2 图的比例尺

地形图不可能根据各种地物的实际大小进行描绘,而是将实地尺寸缩小到若干分之一来描绘。图上某直线的长度 l 与地面上相应线段实际的水平长度 L 之比,称为图的比例尺。一般用分子为 1 的分数形式表示:

$$\frac{1}{M}=\frac{l}{L}$$

上式中 M 为比例尺分母。实用的比例尺有$\frac{1}{50}$、$\frac{1}{100}$、$\frac{1}{500}$、$\frac{1}{1000}$等等。比例尺的大小视分数值的大小而定,分数值愈大,比例尺亦愈大,分数值愈小,则比例尺愈小。以分数形式表示的比例尺为数字比例尺。数字比例尺也可以写成 1:50、1:100、1:500、1:1000 等形式。知道了比例尺之后,就可以根据图上两点间的距离计算出地面上相应两点的水平距离,也能够由地面上两点的水平距离计算出图上相应的距离。

为了用图方便,地形图上一般还绘有图解比例尺。因为图纸在不同的干湿情况下具有一定的伸缩性,旧的图纸也有较大的变形,而且考古报告或论文中发表的图形往往需要经过缩小制版,这些情况下使用

数字比例尺就会产生很大的误差甚至导致无法使用，而图纸上的图解比例尺则与图纸一同伸缩变化，可以在各种情况下直接使用。

图解比例尺是在一段直线上截取若干相等的线段，称为比例尺的基本单位，一般为 1 厘米或 2 厘米，将最左端的一段基本单位又分成十个或二十个小段。如图 2.18 所示为 1:2000 的图解比例尺，其基本单位为 2 厘米，相当于实地 40 米。最左的基本单位分成二十等分，即每小分划为 1 毫米，相当于实地 2 米。为了使用方便，在图解比例尺上标注的一般是实地长度值。图 2.18 中表示的一段距离为 119 米。

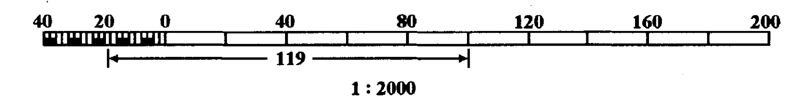


图 2.18　图解比例尺

测图用的比例尺愈大，就愈能表示出测区地面的详细情况，但测图所需的工作量也愈大。因此，测图比例尺关系到实际需要、成图时间及测量费用。一般以工作需要为决定的主要因素，即根据在图上需要表示出的最小地物有多大，点的平面位置或两点间的距离要精确到什么程度为准。这里首先需要说明一个问题，人的眼睛由于视觉的限制，正常情况下能分辨的最短距离一般为 0.1 毫米，因此实地丈量地物边长，或丈量地物与地物间的距离，只要精确到按比例尺缩小后，相当于图上 0.1 毫米即可。在测量工作中称相当于图上 0.1 毫米的实地水平距离为比例尺的精度。表 2.2 为几种比例尺的比例尺精度。

表 2.2　比例尺的比例尺精度

比　例　尺	1:500	1:1000	1:2000	1:5000	1:10000
比例尺精度/m	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0

2.8　测图原理与测量工作概述

2.8.1　测图原理

地图是把地面上高低不等的点投影到参考椭球面上而成的，当测

区范围较小时，可以把投影面当成平面。平面位置测量原理，是把平面安置成水平面，将地面点沿铅垂线方向投影到水平面上，得到正射投影图，再按比例缩小。地形图上各点是实地相应点在水平面上正射投影的位置用测图的比例尺缩绘在图纸上而得的，于是，测量工作中点位之间有如下关系：(1) 测定地面上两点之间的距离，是指两点之间的水平距离；(2) 测定两条边之间的夹角，是指通过角顶的两条边所作的两个竖直平面之间的夹角，测量学中称为水平角；(3) 地面上各点的高程，是指各点沿铅垂线方向至大地水准面的距离之差，即高程之差。

2.8.2 测量工作概述

2.8.2.1 测量控制

在地面上从事测图工作时，需要测定很多碎部点(地物点和地貌点)的平面位置和高程。由于任何一种测量工作都会不可避免地出现误差，所以每次测量时都必须采取一定的程序和方法，以防止误差的积累。

在实际测量工作中是遵循“从整体到局部”，“先控制后碎部”的程序，也就是在测区内先选择一些有控制意义的点，首先把它们的平面位置和高程精确地测定出来，然后再根据它们测定其他地面点。这些有控制意义的点组成了测区的测量骨干，所以称这类点为控制点，然后再根据它们测量附近的碎部点。

对于全国性的测量工作，由于幅员广阔，必须采取分等级布置控制的办法，才能既符合精度要求而又合乎经济原则。国家基本控制按照精度的不同，一般分为一、二、三、四等，由高级向低级逐步建立。这些国家基本控制点统称为大地点，是测图的必要依据。

当上述国家基本平面控制点和高程控制点的密度不能满足测图要求时，可根据需要用不同的方法在高级控制点间逐步地进行控制点的加密，直至满足测图工作的要求为止。这种为测图而加密的控制点称为地形控制点，亦称图根控制点。

2.8.2.2 碎部测量

碎部测量就是遵循“从整体到局部”、“先控制后碎部”的程序，根据邻近控制点来确定碎部点(地貌点和地物点)对于控制点的关系。如果测量的目的只是为获得地面物体水平投影的位置，则称这种测量为地物测量。如果测量的目的既要获得地面物体的水平投影位置又要

获得其高程,则这种测量就是地形测量。碎部测量的最后成果是用图表示的,要完成这个目的有两种不同的测量程序:其一在野外用仪器将碎部点与控制点的关系(包括距离、方向和高差)测定,并将这些数据记录下来,再在室内进行绘图,这就是一般所说的测记法。另一种是在野外根据图解的原理当时就把碎部点的位置确定下来,在野外进行绘图工作,这种方法一般称为测绘法,也是最常用的方法。用图表示地面上地物的形状大小,有的可以按比例缩小描绘在图纸上;有的由于实物较小,按比例缩小后无法在图纸上绘出,则可不按比例而用规定的符号表示其位置。地貌一般是用表示高程的等值线即等高线表示的。等高线既能表示出地形的高低起伏情况,也能表示其水平投影的位置。有的地貌用等高线表示有困难,也可用规定的符号来表示。

在各项测量工作中,必须随时检查,杜绝错误,没有对前阶段工作的检查,就不能进行下一阶段的工作,这是测量工作中必须坚持的原则之一。为了不使误差积累,必须遵循“先整体后局部”,即“先控制后碎部”的原则;为了保证成果的质量,必须坚持随时检查的原则,这样才能保证测量成果的质量和较高的工作效率。

第三章　卷尺丈量与罗盘仪的使用

测量角度并配合一定的直线长度测量，可以确定地面点的位置，如果不测量角度，只是全面地测量直线的长度，同样也可以确定地面点的位置。所以直线长度测量是全部测量工作的基础。

测量一条直线的长度就是指确定直线两端点间的水平距离。如果两端点的高程不同，则指这两点铅垂线间的水平距离。直接测量两点间距离的方法有：步测法、尺子丈量法、光电测距法、视距尺视距法和横基尺视距法等。三角测量也是测量距离的方法，它是把需要测量的点构成几何图形，测量图形一条边的长度和必要的角度，然后通过计算求得其余各边的长度。

3.1　卷尺丈量距离

直线丈量就是用已知长度的尺子对一直线进行直接的比较，从而获得直线的长度。卷尺丈量的工具简单，适用于平坦地区的距离测量工作，地形起伏较大的地区则较难开展工作，而且不便于进行长距离的丈量。

丈量所用工具有：钢卷尺（钢尺）或布卷尺（皮尺）、测钎、标杆、垂球、水准器等。

卷尺：是直线丈量中应用最广泛的工具，长度有 10 米、20 米、30 米、50 米，以厘米为基本分划，米及分米的分划线注记长度数字。由于尺头零点位置的不同，又分为刻划尺（用尺上所刻的零分划线作尺的零点，并在第一分米内细刻到毫米分划）和端点尺（以尺头最外端作零点），实际使用中需要特别注意。

测钎：是用来标记尺段和计算已丈量过的整尺数量的。一般用 12 号钢丝制成，一端磨尖，另一端弯成回环，全长约 40 厘米，每组测钎为 11 根。

标杆：木质圆杆，长2.0米、2.5米或3.0米，一端装有铁尖，便于插入地面。全杆用红白油漆区分为20厘米长的格区，以便于远方辨认，也可作粗略的距离测量。

3.1.1 平地上丈量距离

1. 定线：很多情况下，卷尺都比要丈量的直线短，这就需要在直线两端的连线上增设若干中间点来标明直线的方向，保证卷尺沿直线方向丈量。把一直线标志在地面上的工作称为直线定线。定线可以在丈量前进行，也可以边丈量边定线。定线工作中所设中间点与其相邻点之间的距离，应稍短于一整尺子的长度。

使用标杆定线时，首先在直线的两端A、B竖立标杆，然后测量员甲在起点A后方1~2米处通过标杆A看标杆B，使眼睛与两端点的标杆成一直线。测量员乙持另一标杆在AB之间，按甲的指挥将标杆插在AB连线上的C点，得到中间点C。

2. 丈量：由后尺手手持卷尺始端于端点A，前尺手留一测钎在A点，自己持卷尺末端和10根测钎沿直线方向前进，约行一尺段距离停下，定线后，将卷尺沿直线方向贴在地面上，拉直拉紧；后尺手使卷尺的零点精确对准点A的标志同时喊“拉”，前尺手持一测钎立于卷尺的终点分划线旁，听到喊声，一边拉紧尺子，一边将测钎竖直地插入卷尺终点的地面并喊“好”；然后，后尺手拾起地面测钎与前尺手一同前进，按前述操作方法进行第二尺段的丈量，如此继续到最后。

丈量结束后，后尺手手中的测钎数目表示已丈量了的整尺段数，所余长度不足一整尺段的称余尺段。最后直线全长等于卷尺长度乘以整尺段数再加余尺段长度。

为了防止丈量时发生错误并提高丈量精度，一般都要作往返丈量。最后比较两次丈量的结果，若合乎规定的精度，取其平均数作为最终结果。而且在丈量过程中，可以使用步测法来帮助工作和进行大致验证。

3.1.2 倾斜地面上丈量距离

在倾斜地面上直接丈量水平距离，通常是循下坡方向进行，其方法基本上与平地丈量方法相同，但要将尺子的一端抬高，使尺子两端高度相同（可以用目估或用水准器观察），尺子终点的位置则用垂球来确

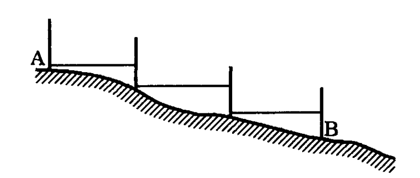
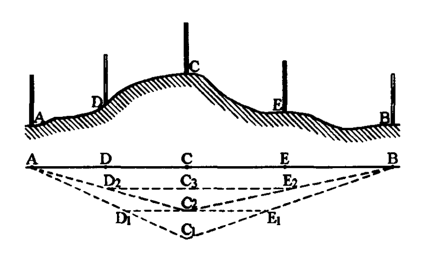


图 3.1 倾斜地面上丈量方法

定，将垂球对准卷尺终点分划线，让其自由下落，垂球尖在地面戳下的痕迹即为丈量的位置，插上测钎后转入下一尺段的丈量。如果地面倾斜较大，可以将整尺段分为几个碎尺段来丈量，如图 3.1 所示。丈量成果的整理与平地上丈量的情况类似。

3.1.3 互不通视的两点间丈量距离

如果 A、B 间为山岗或建筑物所隔，互不通视，则可以运用如图3.2所示的方法进行定线：首先在 A、B 两点竖立标杆，测量员甲在两点之间选择 C 点立标杆，该位置同时能看见 A、B 两点的标杆，测量员乙在 C_i B 连线上确定 E_i，测量员丙在 C_i A 连线上确定 D_i，并使乙能够看见 D_i 上竖立的标杆，丙能够看见 E_i 上竖立的标杆，然后甲在 D_i E_i 连线上选择 C_{i+1}……逐渐趋近，直至确定 C 点。也可以运用如图 3.3 所示的方法进行定线：首先在 A、B 两点竖立标杆，测量员甲、乙分别持标杆立在 C_i、D_i 点处，测量员甲可以同时看到测量员乙和 B 点的标杆，测量员乙可以同时看到测量员甲和 A 点的标杆。甲指挥乙移动手中的标杆，使 C_i、D_i 与 B 点的标杆成一直线，再由乙指挥甲移动手中的标杆，使 C_{i+1}、D_i 与 B 点的标杆成一直线，……逐次趋近，直到 A、C、D、B 在一条直线上。最后按倾斜地面上丈量距离的方法分成碎尺段进行丈量。



剖面图

平面图

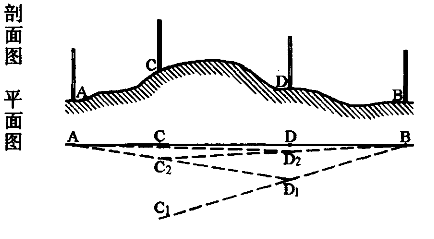


图 3.2 互不通视两点间的定线

图 3.3 互不通视两点间的定线

丈量结果的计算方法为：卷尺长度 × 整尺段数 + 余尺段长度，但有时所使用的卷尺长度有一定的误差，所以在要求角度较高的丈量计算中需要加上尺长改正。

3.2 尺长方程式与钢尺的检定

3.2.1 尺长方程式

较精确的钢尺出厂时必须经过检定。其长度用尺长方程式表示：

$$l_t = l + \Delta l + a \times (t - t_0)$$

式中：l_t 为钢尺在温度 t 时的实际长度；

l 为钢尺上所刻注的长度，即名义长度；

Δl 为尺长改正数，即钢尺在温度 t_0 时的改正数；

a 为钢尺的膨胀系数，一般钢尺当温度变化 1℃时长度变化值约为 $11.6 \times 10^{-6} \sim 12.5 \times 10^{-6}$；

t_0 为钢尺检定时的温度；

t 为钢尺使用时的温度。

此式未顾及拉力变化，因此丈量时的拉力应与检定时的拉力相同，通常为 10 公斤。

每根钢尺都应有尺长方程式才能得出实际长度，但尺长方程式中的 Δl 会因自然因素的影响而起变化，故尺子使用一个时期后必须重新检定，得出新的尺长方程式。

3.2.2 钢尺检定的方法

1. 比长检定法

用一根已有尺长方程式的钢尺作为标准尺，使其与被检定尺相比较。两根钢尺的膨胀系数被认为是相同的。检定时，标准钢尺和被检定钢尺并排放在平坦的地面上，都加上规定的拉力，把两根钢尺的末端对齐，在零分划附近读出两尺的差数，这样就能根据标准钢尺的尺长方程式计算出被检定钢尺的尺长。检定时最好在阴天或阴凉处进行，使大气温度与钢尺温度基本一致。

2. 利用两固定点间已知长度检定法

在地面上埋设两个固定点作为基准线，首先用已有尺长方程式的标准钢尺进行若干次丈量，以其平均值作为这条基准线的真实长度。一般说这个长度只要两固定点位置不变，可保留较长时间。地面点之间的距离虽不受温度影响，但埋设时间较久后，少量的位移还是有可能的，也就

是说两点间的实际长度可能起变化。所以两点间的距离宜适当长些,这样,点位少量位移所造成的丈量相对误差影响就会小些。基准线长度一般为钢尺长度的若干倍,例如取基准线长约300米是合适的。然后使用待检定钢尺丈量基线长度若干次,再计算出被检定钢尺的尺长。

3.3 钢尺丈量距离的误差来源

平坦地区的一般丈量若考虑了温差改正和尺长改正,并用弹簧秤衡量拉力,在外界条件良好的情况下,丈量精度可达1:5000以上。若地面起伏,必然分段较多,丈量精度也能达到1:3000。在地面崎岖不平,坡度多变化的困难条件下,只要仔细丈量,其精度也不会低于1:1000。

往返两次丈量的结果,一般不会绝对相同,这说明丈量中不可避免有误差存在。丈量中的误差来源有下列几种:

1. 尺长误差

如果钢尺未经检定或未按尺长方程式进行改算,仅用钢尺名义长度计算丈量的距离,则其中就包含了尺长误差。尺长误差应该进行改正,以减少丈量的误差。用同一根钢尺往返丈量,这种误差不会被发现,但实际是存在的。

2. 温度变化的误差

钢尺具有一定的膨胀系数,每米每度温差变化仅八万分之一,但温差较大,距离很长时其影响也不小。再说一般测定的是空气温度,并未反映钢尺的实际温度,特别是沿地面丈量,钢尺温度与空气温度可能相差较大,因此,对于较精确的丈量,无论在检定钢尺和使用钢尺时都以测定钢尺温度为好,可用点温计测定尺温。

以上两项在尺长方程式中已考虑了。

3. 拉力误差

拉力的大小会影响钢尺的长度。如果丈量不用弹簧秤衡量拉力,仅凭司尺员手臂的感觉,则难免与检定时所施加的拉力存在误差。由拉力误差而引起的钢尺长度误差,其正负号决定于拉力误差的正负。凡丈量时拉力大于检定时拉力,这项误差为正,即钢尺伸长了;反之为负。

4. 丈量本身的误差

如对准钢尺端点时产生的误差,插测钎时产生的误差等。又钢尺

基本分划为厘米，若读数只要求读到厘米，就可能会有5毫米的凑整误差。所有这些误差是在工作进行中由于人的感官能力限制而产生的，其性质可正可负，或大或小，因此实际结果中已抵消了一部分，但这是丈量工作中的一项主要误差来源，无法全部消除。

5. 钢尺垂曲的误差

所谓垂曲，就是钢尺悬空丈量时中间下垂而产生的误差。悬空丈量时尺子中间必然有下垂现象，所以钢尺检定时要考虑这一因素，把尺子分悬空与水平两种情况予以检定，得出各自相应的尺长方程式。在成果整理时，若按实际情况采用相应的尺长方程式，这项误差就不存在了。但是拉力与规定有差异时仍会产生影响，只是这种影响很小而已。

6. 钢尺不水平的误差

直接丈量水平距离时钢尺应尽量水平，否则会产生距离被丈量长的误差，这与把倾斜距离改算为水平距离具有相同的性质。根据计算，一根30米长的钢尺，若尺的两端高差达0.4米，则使30米距离增长约2.67毫米，其相对误差约为1∶11200。要求这样的钢尺整尺段两端高差小于0.4米是不难达到的，因此只要丈量时旁边有人仔细目估水平，这项误差实际很小。

7. 定线误差

钢尺丈量时应直伸，并紧靠所量直线，如果偏离定线方向，就会成为一条折线，把实际距离量长了。这类情况与上述钢尺不水平相似，只不过前者是竖直面内的偏斜，而后者是水平面内的偏斜，故误差值的计算公式也相同。

3.4 直线定向

3.4.1 直线定向的概念

测量工作中，常常需要确定两点间平面位置的相对关系，为此，必须同时测量两点之间的距离和两点连线的方向，而一条直线的方向是根据某一基本方向来确定的。直线的定向就是确定一条直线与作为定向起始方向线的夹角。

测量工作中有三种基本方向：

1. 真子午线方向

真子午线是过地面某点的真子午面与地球表面的交线。真子午线北端所指方向为真北方向,可以用天文测量的方法或用陀螺经纬仪测定。

2. 磁子午线方向

磁子午线方向是过地球某点的磁子午线的切线方向,它可以用罗盘仪测定。即当磁针静止时所指的方向为磁子午线方向。其北端所指方向为磁北方向。

3. 坐标纵轴方向

我国地图常采用高斯平面直角坐标系,用3°带或6°带投影的中央子午线作为坐标纵轴。因此在该带内的直线定向,就是用该带的坐标纵轴方向作为基本方向。坐标纵线北端所指方向为坐标北方向。

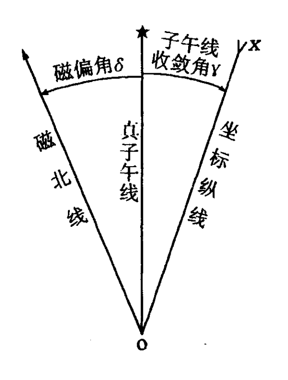


图 3.4　三北方向图

图 3.4 为三个基本方向之间关系的一种情况,1:5 万比例尺地形图图廓下方所绘三北方向中的真子午线,是该图幅所在投影带中间位置的真子午线。真子午线与坐标纵线之间的夹角为子午线收敛角(用 γ 表示),坐标纵线偏于真子午线以东时为正值,反之为负;磁北线与真子午线之间的夹角为磁偏角(用 δ 表示),磁北线偏于真子午线以东时为正值,偏于西者为负值。

3.4.2　直线定向的方法

测量学中一条直线的方向经常用方位角来表示。方位角是从基本方向的北端开始,顺时针方向量到一直线的水平夹角。方位角的数值范围是 0°~360°。小于 0°或大于 360°的方位角应该通过加或减 360°的方法,换算至 0°~360°的范围内。对应于三个基本方向,方位角也有真方位角 A、磁方位角 A_m 和坐标方位角 α 三种情况,而且根据三北方向线的夹角关系,真方位角、磁方位角与坐标方位角之间可以根据需要,进行相互转换。

1. 真方位角和磁方位角之间的关系

由于地球磁极与地球旋转轴的南北极不重合,因此过地面上某点的真子午线与磁子午线不重合。直线的真方位角与磁方位角之间可用下式换算:

$$A = A_m + \delta$$

地球上不同地区的磁偏角是不同的，我国磁偏角的变化大约在+6°到-10°之间。北京地区磁偏角为西偏，约-5°左右。同时，地球磁极是不断变化的，地磁北极正以每年10公里的速度向地理北极移动。由于磁极的变化，磁偏角也在变化。另外罗盘仪还会受到地磁场及磁暴、磁力异常的影响。所以磁方位角一般用于精度要求较低、定向困难地区的测量工作。

2. 真方位角和坐标方位角

地面上不同经度的子午线都会聚于两极，所以真子午线方向除了在赤道上的各点外，彼此都不平行。由于存在着子午线收敛角，因此离开各投影带的中央子午线，各点坐标纵方向与子午线方向不重合，坐标纵轴方向位于真子午线方向以东时 γ 取"+"，反之取"-"。真方位角和坐标方位角之间可用下式换算：

$$A = \alpha + \gamma$$

纬度愈低，子午线收敛角愈小，在赤道上为零。纬度愈高，子午线收敛角越大。

3. 正、反坐标方位角及其相互关系

以平行于纵坐标轴（坐标纵线）的方向为基本方向的方位角，称为坐标方位角，简称方向角。如图3.5中直线AB，A点为起点，B点为终点。过起点A的坐标纵轴的北方向与直线AB的夹角 α_{AB}，称为直线AB的正方位角。过终点B的坐标纵轴北方向，与直线BA的夹角 α_{BA}，称为直线AB的反方位角。正、反方位角相差180°，所以

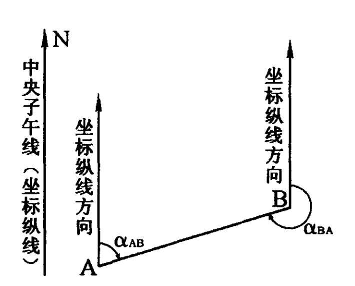


图3.5 正、反坐标方位角

$$\alpha_{AB} = \alpha_{BA} \pm 180°$$

由于地面两点的真（磁）子午线不平行，存在子午线收敛角和磁偏角，则真（磁）方位角的正、反方位角不是差180°，而存在收敛角（磁偏角）。而且收敛角随纬度不同而变化，这将给测量计算带来很多不便。所以测量工作中常用坐标方位角进行直线定向。

3.5 罗盘仪的使用

罗盘仪的主要用途是测定磁北方向、磁方位角和地面坡度的倾斜角等。罗盘仪是田野考古工作常用的仪器，无论是调查还是发掘都要使用罗盘仪。罗盘仪根据盘面刻度的不同分为象限罗盘和方位罗盘两种。

用磁针测定直线的方向较方便，但磁针测定磁北方向的精度不高。磁针是指向地球的磁北极或磁南极。概略地说，磁北极在北纬 74°西经 110°附近，磁南极在南纬 69°东经 114°附近。严格地说，磁极每年在移动，因此磁偏角在同一地点也不是定值，甚至每天早晚测定的磁偏角也有微小的差异。所以磁偏角有长期变化和周日变化。此外，磁针受环境影响较大，如工作场所附件的钢铁建筑物与一些矿藏、高压电线都会影响其所指方向，更会受到偶然性的磁变反常现象的影响。

我国位于北半球，在使用磁针时，由于受磁北极的引力较大，所以磁针并不水平，而是磁针北端向下倾斜。愈靠近两极，磁针下倾就愈大。磁倾角就是磁针表面与水平面间的夹角。磁针的下倾使实际操作很不方便，所以，北半球国家都在罗盘仪的磁针南端绕以铜丝，以使磁针受力平衡，处于水平状态。

罗盘是测定直线磁方向的工具，种类很多，但其构造大同小异，都是由磁针、度盘和照准设备等主要部件组成。磁针用人造磁铁制成，当磁针摆动静止时，其北端即指向磁北方向，在停止使用时应利用制动器把磁针托起，使之贴紧在玻璃盖上得以固定。罗盘仪的刻度盘是铜或铝制圆盘，一般最小分划值为 1°，每 10°作一注记。注记的形式有两种：其一按逆时针方向由 0°到 360°，如图 3.6 a 所示，称为方位罗盘；其二有南北相对两个 0°，向两个方向分别注记到 90°，如图 3.6 b 所示，称为象限罗盘。在象限罗盘上除注有南北字样外，并注有东西字样。由于使用罗盘定向

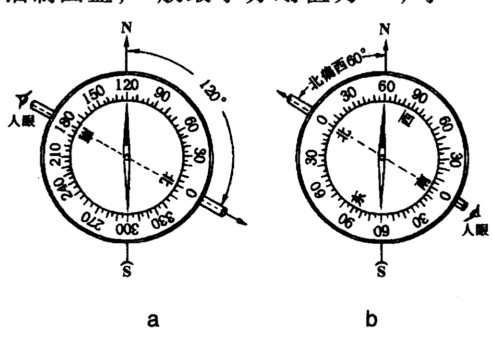


图 3.6 罗盘仪的注记形式

时，分度盘随着照准设备转动，而磁针静止不动，所以东西方向与实际情况相反。同样，方位角是按顺时针从北端算起的，而方位罗盘是自北端按逆时针注记的。此外，在度盘上还附有改正螺丝。若转动它，刻度盘就随之而转动，可以起到改正度盘读数的作用，测量方位角之前一般使刻度盘的0°与指标线方向一致。

3.5.1 地质罗盘仪

考古工作中常见的是地质罗盘仪，如图3.7所示，照准设备是安装在0°与180°方向上的一对折叠式觇板，与装在盒盖上的反光镜配合使用。此外，底盘上还装有圆水准器（或管水准器）和倾斜指示器。水准器供安置罗盘仪水平之用。罗盘盒的底面装有操纵测斜指示器的手把，转动手把可使管水准器与测斜指示器同时转动，供测量倾斜角时使用。

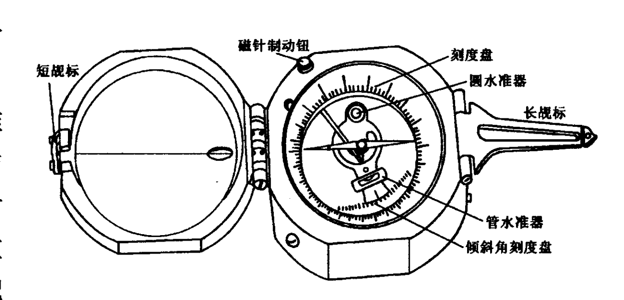


图3.7 地质罗盘仪

3.5.1.1 测定磁方位角

当观测目标之仰角小于45°或俯角小于15°时，从反光镜中可看到目标，此时把觇板竖直，两手托住罗盘，紧靠观测者腹部，将度盘零度方向对准目标，并使水准器的气泡居中，直至长觇板和目标的象同时被镜面的中线所平分，即可按磁针北端读取磁方位角。

当目标俯角大于15°时，用上述方法不易在镜中看到目标的像，此时就应把罗盘零度方向调转180°，将180°的刻度线对向目标，并使水准器的气泡居中，从长觇板上的尖端经过镜子下方的透明椭圆孔的中线来照准。但此时应注意，要按磁针南端来读取磁方位角。

3.5.1.2 测量倾斜角

测量倾斜角时，应该关闭磁针制动开关。如果测量一个倾斜边的角度，直接将罗盘侧立于斜边上，用手调整罗盘仪后面的手把，使长盒水准器居中，水准器下的指标所指出的底盘刻线度数即为倾斜角度。

3.5.2 五一式罗盘仪

五一式罗盘仪构造如图 3.8，与地质罗盘仪相比，它缺少调测水平部分，即没有长盒水准器和圆盒水准器。其测定倾斜角是依靠重力作用，只要用准星平视镜瞄准目标，倾斜角通过指针自然下垂就可以标出。转动度盘，只需用手拧动盖圈转到所需角度，较之地质罗盘仪简便。注意每次用毕还需拧回来，使“北”方对准“▲”标记。

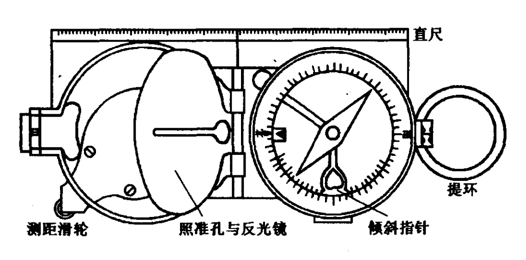


图 3.8　五一式罗盘仪

五一式罗盘仪比地质罗盘仪多了部分功能：其一是将上盖全部打开后，侧面直尺即可成为 10 厘米的尺段。其二为测距滑轮，它可以测定比例尺为 1∶2.5 万、1∶5 万、1∶7.5 万、1∶10 万的各种地形图上的曲线距离。使用时，首先将盒外的指针调到红色起始线上，然后将滑轮沿着要测定的线路滚动。从圈内所记的数字即可知线路的距离，单位为公里。当然也可以用它测量其他比例尺地图上的距离，只需进行一些简单的换算就可以得到结果。

第四章　地形图测图原理

为了控制测量误差的累计，并能按图幅全面展开测图工作，必须遵守“从整体到局部”和“先控制后碎部”的原则，而不是从一点开始逐点施测。即以国家控制点为依据，先在测区范围内选定一些对整体具有控制作用的点，用较高的精度精确测定各控制点的平面坐标和高程，形成全测区的测图骨干，然后根据这些控制点来测量其周围一定距离内的地物和地貌。建立测图控制点的工作称为控制测量，控制点又称为图根点。为了直接满足测图的需要，图根点必须达到足够的密度，如果地物地貌复杂，所需的图根点将更多。

控制测量包括测图控制点的平面位置测量和高程测量。

平面控制测量是为测定控制点平面坐标(x,y)所进行的测量工作。可采用全球定位系统（GPS）、三角测量、三边测量、边角测量和导线测量等方法建立平面控制网。

高程控制测量是测定控制点的高程。高程控制网主要采用水准测量、三角高程测量和 GPS 高程测量的方法建立。用水准测量方法建立的高程控制网称为水准网。三角高程测量主要用于地形起伏较大、直接水准测量有困难的地区，为地形测图提供高程控制。

控制网具有控制全局、限制误差累积的作用，是各项测量工作的依据。控制网的布设应遵循整体控制、局部加密，高级控制、低级加密的原则。平面控制网和高程控制网的布设范围应相适应，一般分别单独布设，也可以布设成三维控制网。

国家制定了一系列相应的测量规范，对各种控制测量的技术要求做了详细规定。在测量工作中应严格遵守和执行测量规范。

4.1 角度测量概述

4.1.1 角度测量的概念

角度测量包括水平角和竖直角的测量。水平角是相交的两直线之间的夹角在水平面上的投影;竖直角则是一条直线与其竖直面内水平方向线之间的夹角。

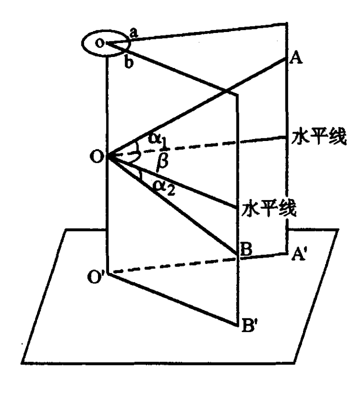


图 4.1 角度测量的原理

若地面上有高度不同的点 O、A、B(如图 4.1),把它们连成相交的 OA 和 OB 两直线,可构成空间斜角∠AOB。由测图原理可知,测量中所需的水平角∠A'O'B'(β),则为这个斜角在水平面上的投影;或者是过直线 OA、OB 的两个竖直面所形成的二面角。竖直角是指在一个竖直面上的直线与水平线的夹角。如 OA 的竖直角为 α_1(是仰角,符号为正),OB 的竖直角为 α_2(是俯角,符号为负)。

为了测量水平角度∠A'O'B',可以设想:(1) 在铅垂线 OO'上的任何位置,放置一个水平分划圆盘,使其中心正好在 OO'线上;(2) 使用一照准装置,使其通过圆盘中心瞄准观测目标(A 或 B),并能把同一竖直面上的任何直线投影为相同的水平方向线(oa 或 ob);(3) 能够在圆盘上读取水平方向线的读数。

水平角∠A'O'B' = ∠aob = 右目标读数 b - 左目标读数 a

或　　∠aob = 右目标读数 b + 360° - 左目标读数 a

同理,为了测量竖直角,必须有竖直的分划圆盘及照准和读数装置。

根据上述测角概念,测角仪器应同时具备以下几何条件:(1) 有一条照准目标的几何直线;(2) 为了保证照准直线在竖直面内上下转动,要有一条与之相垂直的水平轴线;(3) 具有一条竖直的轴线,以便照准

直线绕其作水平方向转动。

4.1.2 竖盘构造

竖直角(简称竖角)是倾斜视线与通过该视线的竖直面内水平方向线或天顶方向(即铅垂线的反方向)之间的夹角,可以由全站仪的竖直度盘来测定。

全站仪的竖直度盘(竖盘)固定在望远镜旋转轴(横轴)的一端,随着望远镜在竖直面内上下转动而一起转动。

竖直角有两种表示形式,一种是目标方向与水平方向间的夹角称为高度角,一般用符号 α 表示。视线上倾所构成的仰角为正高度角,视线下倾所构成的俯角为负高度角,角值的大小是 $-90°$到 $90°$。另一种是目标方向与天顶方向(即铅垂线的反方向)所构成的角,称为天顶距,一般用符号 Z 表示。天顶距的大小从 $0°$到 $180°$,没有负值,大地测量与天文测量中常用这种表示法。

竖盘注记形式很多,因而由竖盘读数计算竖直角的公式也不相同,但其基本原理都是一样的。常见的注记形式为全圆注记,注记的方向又分为顺时针与逆时针两类,如图 4.2 a、b 所示分别为顺时针和逆时针注记的盘左(望远镜在竖盘左侧)与盘右(望远镜在竖盘右侧)情况。

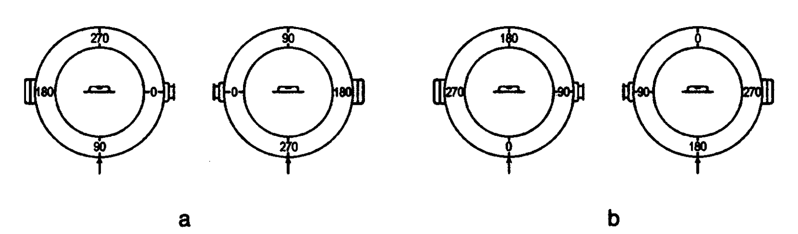


图 4.2 全站仪竖盘的构造

4.1.3 竖直角(高度角)计算公式

在观测竖直角之前,应该从仪器制造厂提供的说明书中把竖直角的计算公式抄录下来;或者是在盘左位置把望远镜大致安置水平,观察一下读数,然后将望远镜慢慢向上或向下倾斜,察看竖盘读数是增加或是减少,推测望远镜的物镜垂直向上或向下时的竖盘读数,由此画出竖盘注记情况图,推导出竖直角(高度角)的计算公式。

测定竖直角就是照准目标时进行读数，竖直角的计算公式就是目标方向的读数与视线水平时的读数之差。在仰角情况下，把望远镜放在大致水平位置观察一下读数，望远镜逐渐上倾时观察读数是增加还是减少，即可得出计算公式：

如果竖盘读数增加，则竖直角 α = 照准目标时的读数减去视线水平时的读数；

如果竖盘读数减少，则竖直角 α = 视线水平时的读数减去照准目标时的读数。

1. 图 4.2 a 所示为常用全站仪的竖盘注记形式。以 α 表示竖直角，L 为盘左时视线照准目标时的读数，R 为盘右时视线照准目标时的读数。

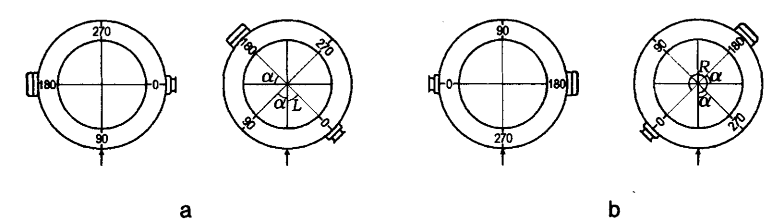


图 4.3　竖直角的计算

由图 4.3 可知，当望远镜上倾，盘左时读数减少，盘右时读数增加，可以得出竖直角的计算公式为

$$\alpha_{左} = 90° - L$$
$$\alpha_{右} = R - 270°$$

由于竖盘读数 L 和 R 常常含有误差，$\alpha_{左}$ 与 $\alpha_{右}$ 往往不相等，竖直角应为

$$\alpha = \frac{1}{2}(\alpha_{左} + \alpha_{右}) = \frac{1}{2}[(R - L) - 180°]$$

2. 在图 4.2 b 情况下，当望远镜上倾，盘左时读数增加，盘右时读数减少，可以得仰角（正的竖直角）的计算公式为

$$\alpha_{左} = L$$
$$\alpha_{右} = 180° - R$$

即
$$\alpha = \frac{1}{2}(\alpha_{左} + \alpha_{右}) = \frac{1}{2}[(L - R) + 180°]$$

同样，当视线下倾时，盘左时读数减少，盘右时读数增加，可以得

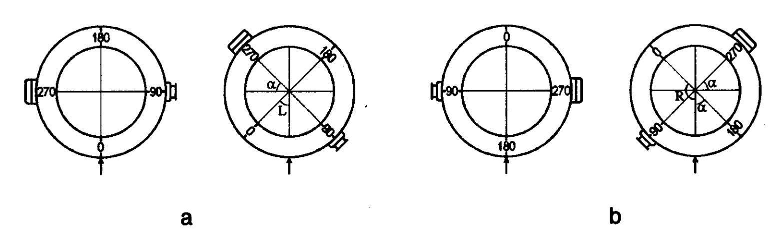


图 4.4 竖直角的计算

出俯角(负的竖直角)的计算公式为

$$\alpha_{左} = L - 360°$$

$$\alpha_{右} = 180° - R$$

即 $$\alpha = \frac{1}{2}(\alpha_{左} + \alpha_{右}) = \frac{1}{2}[(L - R) - 180°]$$

因此这种注记竖直度盘的竖直角计算公式为

$$\alpha = \frac{1}{2}[(L - R) \pm 180°]$$

应用上式时,应该是仰角用 +180°,而俯角用 -180°,但当角度值较小不易看出时,则可以尝试用"加"或"减"180°计算,然后根据竖直角的取值范围在 -90°至 +90°之间来确定。例如,用图 4.4 所示注记形式竖盘观测目标后,盘左时的读数为 $L = 358°26'24''$,盘右时的读数为 $R = 181°33'36''$。计算竖直角时,如果用公式 $\alpha = \frac{1}{2}[(L - R) + 180°]$计算,则 $\alpha = 178°26'24''$,显然是不合理的,所以必须用公式 $\alpha = \frac{1}{2}[(L - R) - 180°]$计算,则 $\alpha = -1°33'36''$。

4.2 导线测量

4.2.1 导线测量概述

导线就是由若干条直线连成的折线,每条直线称为导线边,相邻两直线之间的夹角称为转折角,两直线的交点称为导线点。导线测量就是测量导线的转折角和边长之后,根据已知方向和已知点坐标计算出各导线点的坐标。根据不同情况和要求,导线可以布置成下列几种形

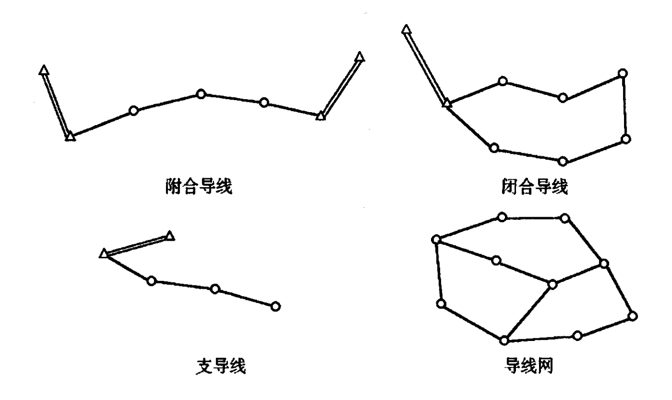


图 4.5 导线的几种形式

式(如图 4.5 所示):

1. 附合导线:导线起始于一已知控制点,而终止于另一已知控制点。

2. 闭合导线:导线由一个已知控制点出发,最后仍回到这一点。

3. 支导线:导线从一个已知控制点出发,既不附合到另一个已知控制点,也不回到原来的起始点。支导线没有检核条件,不易发现错误,不宜采用。

4. 导线网:由两条以上单导线构成的导线形式。

导线测量由于布设灵活,要求通视方向少,边长直接测定,精度均匀,适合在各种考古遗址内的控制测量。随着红外测距仪和全站仪的日益普及,使导线边长加大,精度和自动化程度皆有提高,从而使导线测量得到了更加广泛的应用。

4.2.2 导线测量的外业工作

4.2.2.1 布设与选点

导线设计时应尽可能地利用测区现有的最大比例尺的地形图,首先在图上标出已有的控制点和测量范围,再根据地形条件和测量的具体要求来计划导线的路线和导线点的位置;然后到实地选点,检查所计划的路线和导线点是否合适。当测区没有现成的地形图或者测区范围不大时,可以到实地边勘察边选择导线测量的路线和确定导线点的位置。

选择导线测量路线和导线点位置时应该考虑:

1. 在采用钢尺量距时，导线应尽量沿平坦的路线布设，以便于量边；在使用电磁波测距仪测距时，则不受地形条件的限制。

2. 相邻两导线点之间应能互相通视，以便于测角；为保证测角精度，相邻边长度之比一般不应超过三倍。

3. 导线的边长应大致相等，特别要避免由长边与短边相邻的情况。

4. 导线点应位于视野开阔、土质坚实、便于保存标志和安置仪器的地方，在测区内分布均匀，以便在施测碎部时发挥最大的控制作用。

导线点选定后，应在地面上建立标志，并沿导线走向顺序编号，绘制导线略图。准备长期使用的导线点，一般埋设混凝土桩，顶部刻有十字，或铸入刻有十字的钢筋。对临时图根导线点，通常用小木桩打入土中，桩顶钉一小钉作为标志。为了便于日后寻找、使用，应量出导线点到附近三个明显地物点的距离，并用红漆在明显地物上写明导线点的编号、距离，用箭头指明点位方向，绘制草图，注明尺寸。

4.2.2.2 连接

导线连接角的测量叫导线定向，目的是使导线点的坐标纳入国家坐标系统或该地区的统一坐标系统中。通常导线布设都是从已知高级控制点开始，使导线和高级控制点连成一体，并能在导线计算时获得已知的起始方向和坐标。最简单的导线点连接方式是直线连接。

4.2.2.3 测角

使用经纬仪或全站仪测量转折角或连接角。为了计算方便，一般测量导线前进方向的左角。对于闭合导线，转折角的测量顺序按逆时针方向进行，这样所观测的角度既是左角又是内角。

4.2.2.4 量边

导线边长通常使用钢尺量距、光电测距、视差法测距等方法。每条边均须往返量测，并应满足规定的精度要求。使用电磁波测距仪测量时要同时观测竖直角，以供倾斜改正之用。

4.2.3 导线测量的内业计算

导线测量的最终目的是要计算出各导线点的平面直角坐标，因此外业工作结束后，要根据已知点的坐标和已知方向，以及外业观测的角度和边长数据，进行内业计算。计算之前应该对已知点的坐标和观测数据进行全面审核，排除各种错误。

4.2.3.1 根据已知方向、转折角推算导线边的坐标方位角

坐标计算的必要元素是边长与坐标方位角,边长由外业测量得到,坐标方位角则根据导线的转折角从已知坐标方位角推算而来。在图4.6中,已知AM边的坐标方位角为α_{AM},AM与AP_2边之间的夹角为β_1,则AP_2边的坐标方位角为:

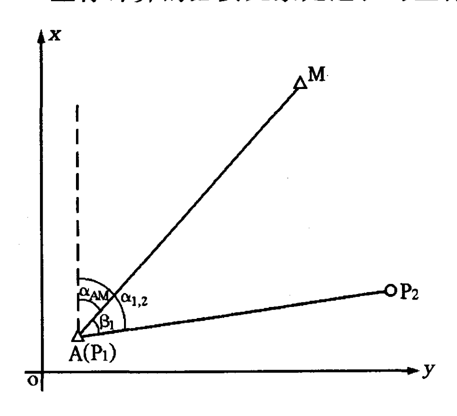


图4.6 推算坐标方位角示意图

$$\alpha_{1,2}=\alpha_{AM}+\beta_1$$

如果从已知点A观测了β_1之后,又在P_2,P_3…点观测了转折角β_2,β_3…,根据上述公式可得P_2P_3的坐标方位角为

$$\alpha_{2,3}=\alpha_{2,1}+\beta_2$$

因为 $\alpha_{2,1}=\alpha_{1,2}\pm 180°$

所以 $\alpha_{2,3}=\alpha_{1,2}+\beta_2\pm 180°$

同样 $\alpha_{3,4}=\alpha_{2,3}+\beta_3\pm 180°$

其普通形式为

$$\alpha_{i,i+1}=\alpha_{i-1,i}+\beta_i\pm 180° \quad (4\text{-}1)$$

按式(4-1)计算过程中,应该注意:

(1) 如果$\alpha_{i-1,i}+\beta_i$小于180°,180°前使用加号;

(2) 如果$\alpha_{i-1,i}+\beta_i$大于或等于180°,180°前使用减号;

(3) 在附合导线和闭合导线的计算中,最终方位角误差应该平均分配到各导线边的方位角中。方位角闭合差为f_β,未知导线点数目为n,其改正数计算公式为:

$$v_{\beta_1}=-\frac{f_\beta}{n+1} \quad (4\text{-}2)$$

4.2.3.2 根据已知点坐标、已知边长和坐标方位角计算未知点坐标

在图4.7中,A为已知点,B为未知点,A点的坐标X_A,Y_A和边长S_{AB}及其坐标方位角α_{AB}均为已知,则B点的坐标为:

$$\left.\begin{aligned}X_B&=X_A+\Delta X_{AB}=X_A+S_{AB}\cdot\cos\alpha_{AB}\\Y_B&=Y_A+\Delta X_{AB}=X_A+S_{AB}\cdot\sin\alpha_{AB}\end{aligned}\right\} \quad (4\text{-}3)$$

在进行坐标计算时，通常都是先计算出已知点与未知点之间的坐标增量，然后再计算未知点的坐标。同时，由于坐标方位角和坐标增量均带有方向性（由下标标示），所以要特别注意下标的书写。

如果导线从已知坐标点 A 开始，终止于另外一个已知点 B，那么该点计算所得的坐标(x_B', y_B')与其已知坐标(x_B, y_B)之间的差值为坐标闭合差：

$$\left.\begin{aligned} f_x &= x'_B - x_B \\ f_y &= y_B' - y_B \end{aligned}\right\} \tag{4-4}$$

坐标闭合差需要按各导线边的长度成正比例地改正各导线点的坐标增量：

$$\begin{aligned} v_{\Delta x_i} &= -\frac{f_x}{\sum S}S_i \\ v_{\Delta y_i} &= -\frac{f_y}{\sum S}S_i \end{aligned} \tag{4-5}$$

4.2.3.3　由两个已知点的坐标计算方位角和边长

在图 4.7 中，设 A、B 为已知点，则坐标方位角 α_{AB}及其边长 S_{AB}为

$$\text{tg}\alpha_{AB} = \frac{\Delta Y_{AB}}{\Delta X_{AB}} \tag{4-6}$$

$$S_{AB} = \frac{\Delta Y_{AB}}{\sin\alpha_{AB}} = \frac{\Delta X_{AB}}{\cos\alpha_{AB}} \tag{4-7}$$

其中，$\Delta X_{AB} = X_B - X_A$，$\Delta Y_{AB} = Y_B - Y_A$

式(4-6)计算出的方位角可能在四个象限内，它由 ΔY_{AB} 和 ΔX_{AB}的正负号来确定，实际计算时最好绘制简图加以确定。

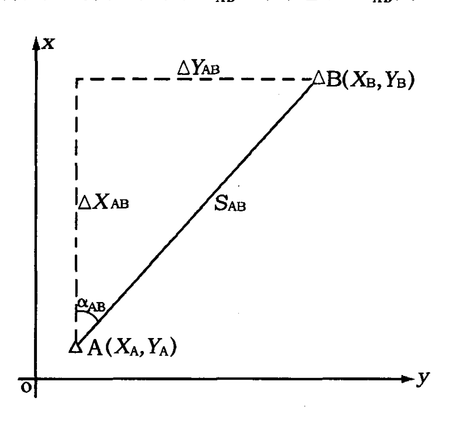


图 4.7　边长、方位角与坐标增量

边长 S_{AB}也可以通过下式计算：

$$S_{AB} = \sqrt{\Delta X_{AB}^2 + \Delta Y_{AB}^2} \tag{4-8}$$

在上述各项计算中，一般角度值精确到 1″，坐标或距离值精确到 1 毫米。

4.3 交会法和单三角形法

当测区内或其周围只有少量控制点的时候，往往不能满足测量工作的需要，有时采用交会法测量控制点。交会法包括测角交会法和测边交会法。测角交会法分为前方交会法、侧方交会法和后方交会法，是应用经纬仪或全站仪观测水平角，然后通过计算求出待定点坐标。测边交会法则是使用电磁波测距仪，测量待定点和已知点之间的距离，再通过计算来确定待定点的坐标。

对于长期进行考古工作的遗址，控制点的位置上应该打入木桩或制作水泥桩，以便对后期发现的遗迹进行补测。

4.3.1 前方交会

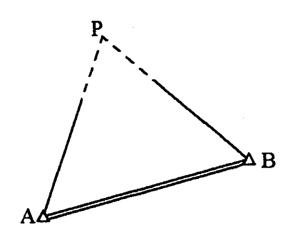


图 4.8 前方交会法

假设 A、B 为已知控制点，P 为待求坐标的加密点，在 A、B 两点观测水平角（∠A 和∠B），如图 4.8，然后根据已知点 A 和 B 的坐标值与∠A 和∠B 的观测值 β_A、β_B，计算 P 点的坐标。在实际工作中，一般要求布设有三个已知点的前方交会，以便进行检核，提高精度，同时又规定图形的交会角（在测角交会图形中，由待定点到相邻两已知点方向的夹角）不得大于 150°和小于 30°；并要求各点之间有良好的通视条件。

4.3.2 侧方交会

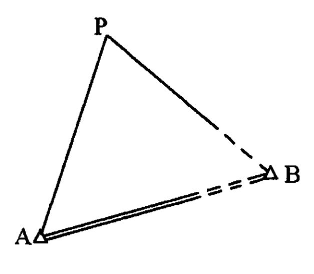


图 4.9 侧方交会法

假设 A、B 为已知控制点，P 为待求坐标的加密点，在已知点 A 和未知点 P 上观测水平角（∠A 与∠P），如图 4.9，从而确定待定点 P 的平面位置。在计算 P 点坐标时，首先根据三角形的内角和为 180°，计算出∠B，再按照前方交会的计算公式计算 P 点的坐标。实际工作中，也有如同前方交会的要求。

4.3.3 后方交会

如图 4.10，以三个已知控制点 A、B、C 为依据，在待定点 P 上架设仪器，观测三个已知点方向的水平角(β_A、β_B)，再结合三个已知点的坐标来计算 P 点的坐标。

过 A、B、C 三个已知点所作的圆称为危险圆，待定点 P 不能在危险圆上，因为在这样的情况下，后方交会中待定点 P 的位置可以是圆周上的任意一点，无法求出待定点 P 的坐标。同时也要避免待定点 P 在危险圆附近的情况，因为此时计算出的坐标值含有较大的误差。此外后方交会的图形组成，要求其交会角不能小于 30°。

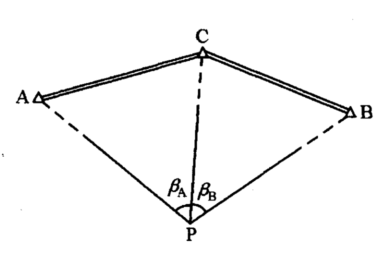


图 4.10 后方交会法

4.3.4 单三角形法

采用交会法测量待定点的时候，要求控制点的数目比较多，在控制点数目只有两个的情况下，可以采用单三角形法进行测量。单三角形法不属于交会法，但计算待定点坐标的方法与前方交会法非常相似。如图 4.11，在测量工作中，通过在已知点 A、B 和待定点 P 上架设仪器，观测三角形的三个内角 β_A、β_B、β_P，然后计算出 P 点的坐标。坐标计算过程中，首先根据三角形的内角之和等于 180°的原理，将三个内角相加，计算内角的观测误差，再将误差平均分配到三个内角中，最后根据前方交会的方法计算待定点 P 的坐标。

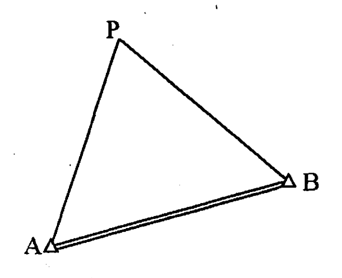


图 4.11 单三角形法

4.4 三角高程测量

根据高程定义可知，测量地面点的高程就是测量该点至大地水准面的垂直距离，或解释为过该点的水准面与大地水准面之间的距离。

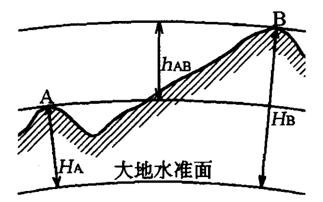


图 4.12 高程测量原理

在一些精度要求不高的测量工作中,可以使用三角高程测量的方法开展工作,传递地面点的高程。

在实际工作中,通常用已知高程点为根据,测量已知点与待定点之间的高差来求得待定点的高程。如图 4.12 所示,点 A 的高程 H_A 已知,如果点 A 到点 B 的高差 h_{AB} 已知,则待定点 B 的高程:

$$H_B = H_A + h_{AB} \tag{4-9}$$

即 $$h_{AB} = H_B - H_A = -h_{BA}$$

高差是一个向量,在测量学中规定:如果 B 点高于 A 点,则高差 h_{AB} 为正值;如果 B 点低于 A 点,高差 h_{AB} 为负值。三角高程测量方法可以测量两点之间的高差。

4.4.1 近距离三角高程测量原理

三角高程测量是根据三角学原理来工作的。图 4.13 中,A 为已知高程点,B 为待定点。在点 A 设置经纬仪,量取仪器高为 i;望远镜十字丝的水平丝照准点 B 上竖立的棱镜中心,照准处 M 距离地面的高度为 v(目标高),视线 OM 的竖直角为 α。由直角三角形 ONM 可知:

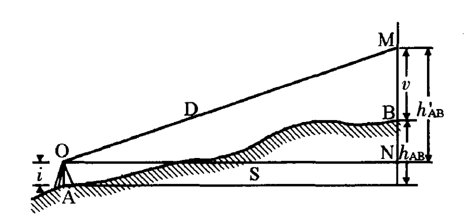


图 4.13 三角高程测量原理

1. 如果点 A 到点 B 的水平距离 S 已知,则:

$$h'_{AB} = MN = S \cdot \operatorname{tg} \alpha \tag{4-10}$$

2. 如果点 A 到点 B 的倾斜距离 D 已知,则:

$$h'_{AB} = MN = D \cdot \sin \alpha \tag{4-11}$$

上述两个公式中,h'_{AB} 的正负号由 $\operatorname{tg}\alpha$ 或 $\sin \alpha$ 的函数值来确定;当 α 为仰角时,$\operatorname{tg}\alpha$ 与 $\sin\alpha$ 为正值,相应的 h'_{AB} 为正数;若 α 为俯角时,则 h'_{AB} 为负数。h'_{AB} 仅是望远镜中心 O 与照准目标(棱镜中心)M 处的高差,称为高差主值。

由图 4.13 可以看出,A、B 的高差为

$$h_{AB} = h'_{AB} + i - v \tag{4-12}$$

表 4.1　近距离三角高程测量的计算手簿

测站点	觇　点	α	s (m)	h′(m)	i (m)	v (m)	f (m)	h (m)	h 中数
N2	N1	-2 03 45	207.32	-7.47	+1.32	-3.00		-9.15	
N2	N3	+3 17 36	185.84	-10.69	+1.32	-2.50		+9.51	
P	黄土坡	+2 11 27	928.17	+35.51	+1.35	-5.60	+0.06	+31.32	
P	金 山	+1 48 48	793.84	+25.13	+1.35	-3.00	+0.04	+23.52	

公式(4-12)为近距离三角高程测量的高差计算公式。在建立这个公式时,是假定仪器安置在已知高程点,向待定点进行观测以确定它们的高差 h(直觇),待定点的高程 H 等于已知点高程 H_0 加高差 h :$H = H_0 + h$;如果仪器是安置在待定点向已知点观测,也可以测定高差 h(反觇):$H = H_0 - h$ 。

4.4.2　三角高程测量的误差分析

在进行三角测量时,会产生多种误差,对测量结果造成影响。这些误差包括:(1) 竖直角观测误差;(2) 边长误差;(3) 大气折光误差;(4) 仪器高与目标高的测定误差。

为了减小各项误差的影响,除了测量前检校好仪器、观测时认真作业外,还可以采取如下措施:(1) 限制观测视线的长度;(2) 规定视线超出地面的高度;(3) 在最有利于竖直角观测的时间内测量竖直角;(4) 在条件许可又有必要时,在两点间进行往返观测。

4.5　传统的碎部测图方法

4.5.1　测图前的准备

图根控制测量结束后,即可着手进行碎部测量前的一系列准备工作,其中主要是准备测图板,它包括图纸的准备、绘制坐标格网及展绘控制点等工作,然后就可以进行碎部测图。传统碎部测图方法一般采用经纬仪与分度规(又称量角器)配合进行,它的优点是使用灵活方便,不必配备平板仪,速度和精度均能达到一定的要求。

4.5.1.1　图纸准备

现在测绘部门广泛采用厚度为 0.07 ~0.1 毫米、表面磨毛后的聚

酯薄膜用于野外测图。聚酯薄膜具有伸缩性小、无色透明、不怕潮湿、性能稳定、牢固耐用等优点，可用水洗涤以保持图面清洁，并可直接在底图上着墨复晒蓝图。但聚酯薄膜有易燃、折痕不易消除等缺点，在使用与保管过程中应注意防火防折，避免接触高温环境。测图时应该在聚酯薄膜下垫上浅色薄纸，再用胶带纸或铁夹固定在图板上，即可开展测量工作。

以前考古测量中经常使用普通绘图纸进行测图，使用医用胶布粘贴或用稀释的鸡蛋清裱糊在图板正面，裱糊时须注意图板与图纸之间不能留有气泡和折痕。图板反面最好也裱糊图纸，以防止图板弯曲，然后晾干即可使用。工作中需要防水、防潮、防晒，还要时刻保持图面的清洁。

4.5.1.2 绘制坐标格网

测图范围内的所有控制点，都是根据各自的平面坐标首先展绘在图纸上，然后才能到野外进行碎部测量。为了精确地展绘各个控制点，首先应该在图纸上精确地绘制坐标格网，又称方格网。一般大比例尺地形图图幅为 50 厘米 ×50 厘米或 40 厘米 ×50 厘米，要求精确绘制成 10 厘米 ×10 厘米的直角坐标方格网。考古测量中可以根据考古遗址的具体情况确定图幅的大小。

坐标格网可使用坐标仪或坐标格网尺等专用仪器工具来绘制，具体方法可参照各自设备的说明书。没有上述专用设备时，可按对角线法绘制，在此以绘制 50 厘米 ×50 厘米坐标格网为例进行介绍。

先用直尺和 3H 铅笔在图纸上画出两条对角线，以其交点为圆心 M，取适当长度为半径画弧，交对角线 A、B、C、D 点，用直线相连得矩形 ABCD(如图 4.14 所示)。分别从 A、B 两点起沿 AB 和 BC 方向每隔 10 厘米定一点，共定出 5 点；再从 A、D 两点分别沿 AD 和 DC 方向每隔 10 厘米定一点，同样定出 5 点；连接对边的相应点，即得 50 厘米 ×50 厘米的方格网。因绘制方格网的精度要求较高，故线条应很细(0.1 毫米)。方格网绘制完毕，应擦去辅助线条。

坐标格网绘制完毕，应检查方格顶点是否在同一直线上，如图 4.14中 ab 线，其偏离值不应超过 0.2 毫米，同时检查各方格边长和对角线长度，方格边长应为 100 毫米 ±0.2 毫米，对角线长度应为 141.4 毫米 ±0.3 毫米。误差超过允许值时，应重绘或修改方格网。

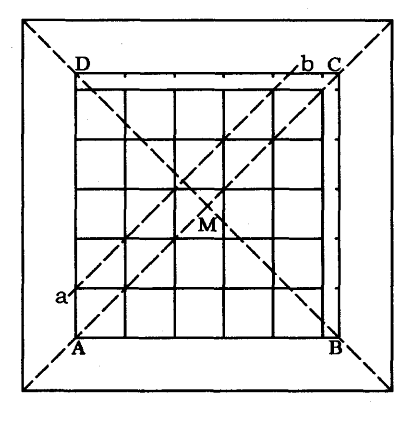



图 4.14 绘制坐标格网线

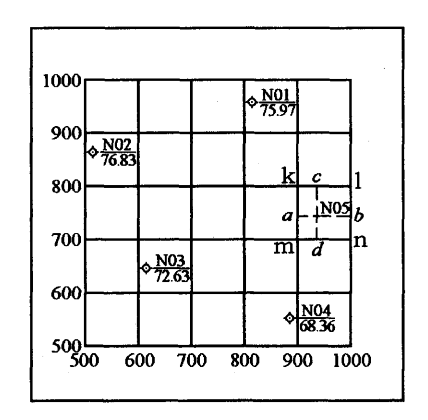


图 4.15 展绘控制点

4.5.1.3 展绘控制点

展绘控制点就是把控制点的坐标位置,按比例展绘到图纸上。展点前,应将坐标格网的坐标值标注在相应方格网边线的外侧(图 4.15)。展点时,首先要确定控制点所在的方格,如 N05 点坐标为 $x = 746.92$ 米,$y = 933.87$ 米,其位置在 klmn 方格内。然后按 x 坐标值分别从 m、n 点以测图比例尺向上各量 46.92 米,得 a、b 两点。同样,根据 y 坐标值可得 c、d 两点,连接 ab 和 cd,其交点即为 N05 点位置。

同法将其他各控制点展绘于图上,最后用比例尺量取相邻点间的长度,与相应的实际距离比较,其差值不应超过图上 0.3 毫米,否则重新展绘。经检查无误后,按图式规定绘出控制点符号,并在其右侧以分数形式注明点号及高程。如图 4.15 所示,分子为点号,分母为高程。最终坐标格网的表示,仅在边线(内图廓)上画 5 毫米短线,图内方格顶点画 10 毫米的"十"字线即可。

4.5.2 分度规极坐标展点测图

极坐标法是根据测站点上一个已知方向,测定已知方向与所求点方向间的角度并量算测站点至所求点的距离,来确定所求点位置的一种方法。

在图 4.16 中,地面上 A、B 两点为已知测站点,在图纸上的相应点为 a、b。为了将房屋测绘到图纸上,先在 A 点架设经纬仪,经整平、对

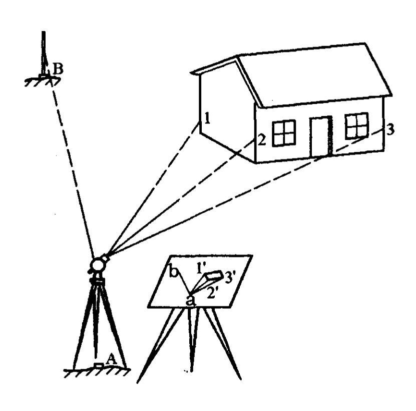


图 4.16 极坐标展点测图

中后，以控制点 B 作为起始方向（或称零方向），照准 B 点的标杆后，安置经纬仪的水平度盘为 0°00′00″，此时控制点 B 也称为测站点 A 的后视点。图板安放在经纬仪一旁的适当位置，在测站点 a 上垂直插入钢针，将分度规的中心圆孔套在 a 点的钢针上。用照准仪瞄准房屋的房角 1，读取水平角 α_1，用视距法测量经纬仪至房角 1 的水平距离 S_1。然后根据 α_1 值的大小放置分度规，使∠ba1′等于 α_1，并在分度规直径刻划上，将 S_1 按测图比例尺截取图上长度，即可定出地面上房角 1 在图上的位置为 1′。用同样的方法可测量房角 2、3 在图上的位置 2′、3′，根据房屋的形状，在图上连接 1′、2′、3′各点，画出矩形即是房屋在图上的位置。

4.5.3 直角坐标展点测图

极坐标展点测图的水平距离是用普通视距测量进行的，测站点至碎部点的距离受到视距精度的限制而不太长。如果在经纬仪上安置小型的光电测距仪，则可以大幅度地增加施测碎部点的距离，充分发挥各个测站点的作用。此外，用分度规按极坐标展点时，由于分度规的最小分划为 15′，同时存在较大的刻划误差，较长的图上距离会使碎部点在图上的位置将产生较大的偏移，从而影响测图精度。为此，很多大比例尺的测量工作中应该采用直角坐标展点。

为了直接由经纬仪读出测站点至碎部点的坐标方位角，经纬仪在照准已知点 B（后视点）定向时（图 4.16），应将度盘配置成 AB 的坐标方位角。这样，经纬仪照准碎部点时的读数就直接是该点的坐标方位角。再根据测量数据与测站点的坐标，计算出碎部点的坐标。

展绘碎部点的工具可用特制的展点仪，也可用边缘刻有毫米分划而质量较高的三角板。考古测量中也可以使用印制精度较高的坐标纸（厘米格纸）进行展点。

不论采用哪种方法施测，都应作如下的检查：

1. 每观测 20 个左右的碎部点之后，要重新瞄准原来的定向目标

(零方向目标),检查测图板方向或经纬仪的照准部有无变动。

2. 所测绘的地物和等高线,应该在迁站前检查其是否有遗漏或不符合实际情况之处,检查无误后才可以考虑迁站。

3. 迁站前还要计划选定二或三个在本站和下一站都能测到的点作为检查点,迁站后首先测绘这些检查点进行检核。

4.6 地物的测绘

地物分为自然地物与人工地物两类,自然地物包括河流、湖泊、森林、草地等,人工地物有房屋、铁路、桥梁、水渠等。地物在地形图上的表现原则是:凡是能依比例尺表示的地物,则将它们水平投影位置的几何形状,相似地描绘在地形图上,如房屋、双线河流等。或是将它们的边界位置表示在图上,边界内再绘上相应的地物符号,如森林、沙漠等。对于不能依比例尺表示的地物,在地形图上以相应的地物符号,表示在地物的中心位置上,如水塔、烟囱、单线河流等。

虽然地物轮廓的几何形状千差万别,但都是由直线和曲线构成的,而且这些直线和曲线又是由一些特征点构成的,因此地物的测绘主要是测量决定地物形状的特征点。如探方的四角、城墙与建筑基址的转折点、壕沟与河流弯曲的变换点等,最后用直线或平滑曲线连接这些特征点,便得到与实地相似的地物形状。测绘地物必须根据规定的测图比例尺,按规范和图式的要求,经过综合取舍,将各种地物准确地测绘在图纸上。

遗址地形图上的现代地物应有所取舍,现代地物除了具有方位意义的之外,一般都可以不予测绘,使图面简洁,突出考古遗迹。

4.6.1 居民地的测绘

考古遗址一般通过村庄来表示其确切的位置,所以遗址范围内的村庄需要测绘到图纸上,一般要准确测绘村庄的外围轮廓线,其内部的主要街道以及较大的空地应区分出来。对散列式的机井房、独立房屋等往往具有方位意义的建筑,应分别测绘。

测绘村庄的外围轮廓线时,先测绘一些转角点,再按顺序连接起来。测绘独立房屋时,测出房屋三个房角的位置,即可画出一个矩形,确定整个房屋的位置。

4.6.2 道路的测绘

铁路符号按图式规定表示。测绘铁路时,一般测量铁轨的中心线;对于1:2000或更大比例尺测图时,还应该测定路堤和路堑等等。铁路的直线部分需测量的点可稍稀一些,在曲线部分及道岔部分就要密一些,这样才能正确地表示出铁路的实际位置和形状。

公路在图上一律按实际位置测绘。在测量方法上有的采用测量公路中心点,有的采用测量路面两侧相互交错的点位,也可以在路面一侧测量一些点,再量测路面的宽度,作业时可视具体情况而定。公路转弯处和交叉处,测量的点应密一些,公路两旁的附属建筑物都应按实际位置测出,公路的路堤和路堑也应该测绘。

大车路一般指农村中比较宽的道路,宽度大多不均匀,道路部分的边界不十分明显。测绘时可测量道路中心点,以地形图图式规定的符号描绘于图上。

人行小路主要是指居民地之间来往的通道,田间劳动的小路一般不测绘,上山小路应视其重要程度选择测绘。测绘道路中心点即可,由于小路弯曲较多,测量时点的选择要注意弯曲部分的取舍。

4.6.3 水系的测绘

水系包括河流、渠道、湖泊、池塘等地物,往往与考古遗址的关系比较密切,无特殊要求时均以岸边为界。河流的两岸一般不大规则,在保证精度的前提下,对于小的弯曲和岸边不甚明显的地段可进行适当取舍。对于在图上只能以单线表示的小沟,不必测绘其两岸,只要测出其中心位置即可。渠道比较规则,有的两岸有堤,测绘时可以参照公路的测法。田间临时性的小渠不必测出,以免影响图面清晰。

湖泊的边界经人工整理,如筑堤或修有其他建筑物的地段是明显的,在自然形成的地段大多不甚明显,测绘时要根据具体情况来确定以湖岸或水涯线为准。在不甚明显地段确定湖岸线时,可采用调查贫水位的边界或根据农作物的种植位置等确定边界。

4.6.4 地类界的测绘

环境考古等方面的研究需要将各类植物分布、土壤类型、岩石类型等的边界测绘到地形图上,用地类界符号表示其范围,再加注符号和说明。

如果地类界与道路、河流、栏栅等重合时，则可不绘出地类界，但与境界、高压线等重合时，地类界应移位绘出。

总之，在测绘地物的过程中，偶尔会发现图上绘出的个别地物与地面情况不符，例如绘出的探方四个角不成直角，一段呈直线的公路在图上不成直线等等。在外业要认真检查产生这种现象的原因，如果属于观测错误，则必须立即纠正。若不是观测错误，则可能是由于各种误差的积累或在两个测站观测了同一个地物的不同部位所引起。当这种现象在图上小于规范规定的地物误差时，则可以采用误差分配的办法予以消除，使图上地物的形状与实际情况相似。

4.7 地貌的测绘

地形图上除了表示各种各样的地物之外，还表示地貌。地貌是指地球表面高低起伏、凹凸不平的自然形态。这些自然形态多数具有一定的规律，地貌测绘就是认识了这种规律后采用一定的测绘技术和恰当的符号，将它们测绘到图纸上。

4.7.1 地貌的基本形态

地形图上需要表现的地貌形态由山、盆地、山脊、山谷、鞍部等五种基本形态组成。各种地貌的形状虽然千变万化，但实际上都可以近似地看成由不同方向和不同倾斜面所组成的曲面，两相邻倾斜面相交的棱线称为地貌特征线或地性线（如山脊线、山谷线等）。在地面坡度变化的地方，比较显著的有：山顶点、盆地中心最低点、鞍部最低点、谷口点、山脚点、坡度变换点等，这些都称为地貌特征点。特征点和特征线构成地貌的框架，确定地形特征点和特征线的平面与高程位置后，就能将整个地貌形态表示出来。所以在地貌测绘中，测点就应选择在这些特征点上，再由特征点连成特征线，绘出地貌形状。

4.7.2 等高线的概念

在地形图上，显示地貌的方法很多，目前常用的是等高线法，等高线能够真实地反映出地貌形态和地面高低起伏。

在图 4.17 中，假定有一高地被水面淹没，水面与地面相交成一个闭合曲线，将该曲线沿铅垂方向投影（即垂直投影）到一个平面 M 上。

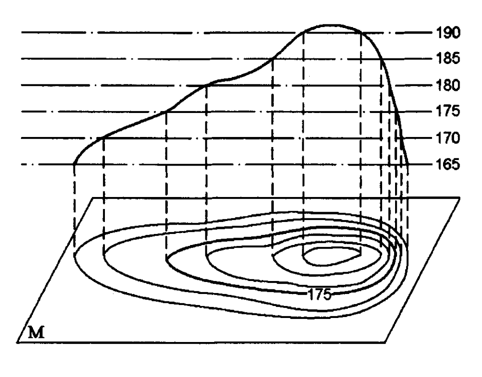


图 4.17　等高线概念

当水面每上升一定的高度(5米)时,都将水面与地面相交的曲线垂直投影到平面M上,于是得到表示该高地起伏的一圈套一圈的闭合曲线,即等高线。所以等高线就是高程相等的相邻地面点连结而成的闭合曲线,也就是一定高度的水平面与地面相交的曲线。再将这些闭合曲线按一定的比例缩绘到图纸上,就得到这一高地的地貌图形。

每根等高线都表示一定的地面高程,相邻两等高线之间的高程差称为等高距,而且在同一幅地形图上一般不能有两种不同的等高距。当比例尺一定时,等高距愈小则图上等高线愈密,地貌显示就愈详细;等高距愈大则图上等高线就愈稀,地貌显示就愈粗略。测绘工作中等高距的选择必须根据地形高低起伏程度、测图比例尺的大小和测绘地形图的目的等因素来决定。

在等高线图上,不难发现盆地的等高线和山头的等高线在外形上非常相似,只是山头地貌是内圈的等高线高程大,盆地地貌是内圈的等高线高程小。为了区别这两种地形,一般选择在最高、最低两条等高线的斜坡下降方向加绘一短线来表示,这种短线叫示坡线,表示坡度下降的方向(如图4.18)。

为了更准确明了地表示地貌的特征,便于应用,地形图上主要采用三种等高线(如图4.18)来表示地貌。

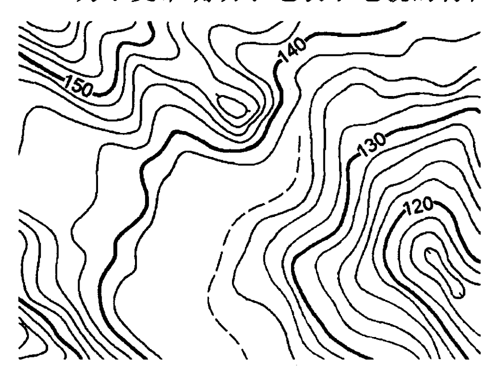


图 4.18　等高线的表示方法

首曲线(基本等高线):根据规定的基本等高距绘出的等高线。

计曲线(加粗等高线):每隔四条首曲线加粗一根等高线,并且注记该等高线的高程。计曲线的高程一般是五倍基本等高距倍数,如果等高

距是1米,计曲线高程的尾数应该是5和0;等高距是5米,计曲线高程的末两位数应该是00、25、50和75。

间曲线(半距等高线):按1/2基本等高距测绘的等高线,用虚线表示,显示首曲线不能表示的比较平坦地区的地貌特征。间曲线一般不闭合。

首曲线与间曲线不注记高程,可根据周围的计曲线和高程点的高程注记来推算。

4.7.3 等高线的特性

根据等高线的定义,可以归纳出等高线具有如下特性:

1. 在同一等高线上各点的高程相等。因为等高线是水平面与地面的交线,所以等高线的这个特性是很明显的。但是不能说凡高程相等的点一定在同一条等高线上。当水平面和两个山头相交时,会产生高程相等的两条等高线。

2. 等高线是闭合曲线。任一高程的等高线必然是一条闭合曲线,由于具体地形图图幅范围的局限,有的等高线可能不在同一幅图内闭合,但会跨越一个或多个图幅闭合。此外,等高线也不能在图幅中间无故断开,只有遇到房屋、公路、某些工业设施及数字注记等情况时,等高线才可以断开。

3. 除了峭壁、陡坎和悬崖处以外,等高线不能相交或重合。因为不同高程的水平面是不会相交的,所以,等高线一般是不会相交的。但是一些特殊地貌,如峭壁、陡坎的等高线就可能会重叠在一起,这些地貌必须加用峭壁、陡坎符号表示。通过悬崖、洞穴的等高线,其投影才可能相交,被覆盖的等高线应该用虚线表示。

4. 等高线与山脊线、山谷线必须正交。两条曲线正交就是过交点所作两条曲线的切线相互垂直。等高线与山脊线、山谷线相交时,必须改变方向,忠实地反映地貌的变化特征。

5. 两等高线间的水平距离称为平距,等高线间平距的大小与地面坡度的大小成反比。在等高距相同的情况下,如果地面坡度愈小,则等高线在图上的平距愈大;反之,如果地面坡度愈大,则等高线在图上的平距愈小。换句话说,坡度陡的地方,等高线就密集;坡度缓的地方,等高线就稀疏。

等高线的这些特性是互相联系的。其中最本质的特性是第一个特

性,其他的特性是由第一个特性所决定的。在碎部测图中,要准确掌握和灵活运用这些特性,才能用等高线准确忠实地显示出地貌的形状。

4.7.4 地貌的测绘

地性线是控制地貌的骨架,地性点是表示地貌的重要依据,测绘地貌时只要选择好地性点,测绘其平面位置和高程,就可以根据具体的地貌形态勾绘出等高线。具体测绘地貌的步骤如下:

1. 测定地性点。地性点是指山顶、鞍部、山脊、山谷的地形变换点、山脚的地形变换点等等,地形复杂的地方应该多测量一些碎部点。地性点采用极坐标法或交会法测定其在图纸上的位置,用小点表示,并在小点旁注记高程。

2. 连接地性线。测定了地性点之后,必须先连接成地性线。通常*以实线连成山脊线,以虚线连成山谷线(如图 4.19),地性线应随着碎*部点的测定而随时参照地面情况进行连接,以免发生错误。而且地性线连接情况是否与实地相符,直接影响到等高线的真实程度,必须认真对待。

3. 确定等高线应通过的点位。所有等高线的高程都是等高距的整数倍,碎部点的位置往往不是等高线应该通过的点位。在连接地性线的工作完成后,即可在同一坡度的两相邻点之间,内插出等高线的通过点。在实际工作中,由于同一坡度的相邻两碎部点在图上的间隔比较近,因此常用目估内插方法来确定等高线通过的点(如图 4.19)。实际工作中一般采用"先取头定尾,后中间等分"的目估法内插等高线。

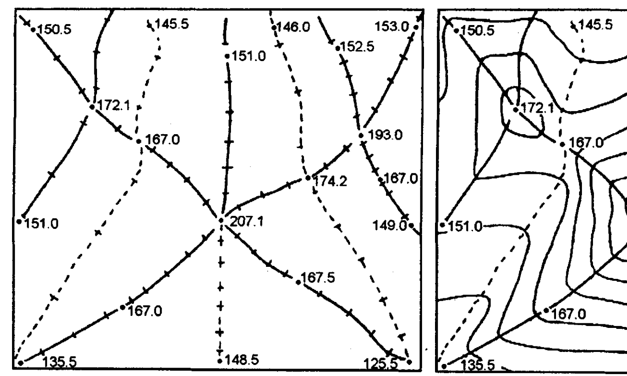


图 4.19 测绘的地性点与地性线　　图 4.20 线性内插绘制的等高线

4. 勾绘等高线。在相邻地性线之间内插出等高线通过点之后，可立即根据实地情况，用平滑的曲线将高程相等的点子连接起来，得到可以反映地貌形态的等高线（如图4.20）。

测绘地貌时，不要等到把全部的等高线通过点都求出来之后再勾绘等高线，而应该是一边测定地性点，一边连接地性线，一边求出等高线通过点，一边勾绘等高线，至少应勾绘出记曲线，往往是测绘完一面山坡之后，再测绘其他地方。勾绘时要对照实地情况来描绘等高线，以便能真实地显示出地貌的形态。

4.7.5 地形图的检查

测绘人员应经常检查自己的操作程序和作业方法，每一测站，以一个方向定向，至少以另一个方向检查；每测站测完后，应对照实地地形，查看地物有无遗漏，地貌表示是否相像，符号应用是否恰当，线条是否清晰，注记是否齐全正确等。当确认图面完全正确无误后，再迁到下一站进行测绘。

测图结束后，应该对地形图进行全面检查，检查的方法分室内检查、野外巡视检查及野外仪器检查。

室内检查首先是对所有的地形控制资料作全面检查，包括检查观测和计算手簿的记载是否齐全、清楚、正确，各项限差是否符合规定。其次是检查原图，主要查看控制点数量是否满足测图的需要，图面地形点数量及分布能否保证勾绘等高线的需要，等高线与地形点高程是否适应，符号应用是否合乎要求等等。

巡视检查应根据室内检查的重点按预定的路线进行。检查时将原图与实地对照，查看原图上的综合取舍情况，地貌的真实性，符号运用与名称注记是否正确等。

仪器检查是在内业检查和外业巡视检查的基础上进行的。除将检查发现的重点错误和遗漏进行补测和更正外，对发现的疑点也要进行仪器检查。仪器检查一般有散点法和断面法两种方法。

4.7.6 地形图的清绘

对铅笔原图按一定的规律进行着墨描绘称为地形图的清绘与整饰。清绘时对原图上遗迹、地物与地貌的位置、形态和类型等均不得更改和增减。为了工作的方便并保证清绘的质量，清绘工作一般按下列

程序进行：

1．估算图形排版时的缩放比例，然后确定图形中线划粗细、注记大小、图框与图例位置等；

2．描绘图廓线、图例框线、控制点、地形点符号及高程注记（高程注记点应尽量减少，以配合等高线反映地貌特征）；

3．考古遗迹、探方等的绘制；

4．独立地物、居民地的绘制；

5．描绘各种线路、水系；

6．描绘各种地貌符号（如陡坎、土崩崖等）及等高线。

图上各种名称、注记的字头一般朝北（向上），位置及排列要适当，既要能表示所代表的内容和范围，又不应遮盖和尽量少遮盖地形符号的线条；考古遗迹的注记应该醒目、清晰，字体和字号都应与其他注记有所区别；等高线注记的位置、分布要均匀、适当，注记时字头指向上坡方向，而且只是计曲线上注记高程，首曲线不能注记高程（图 4.21）。

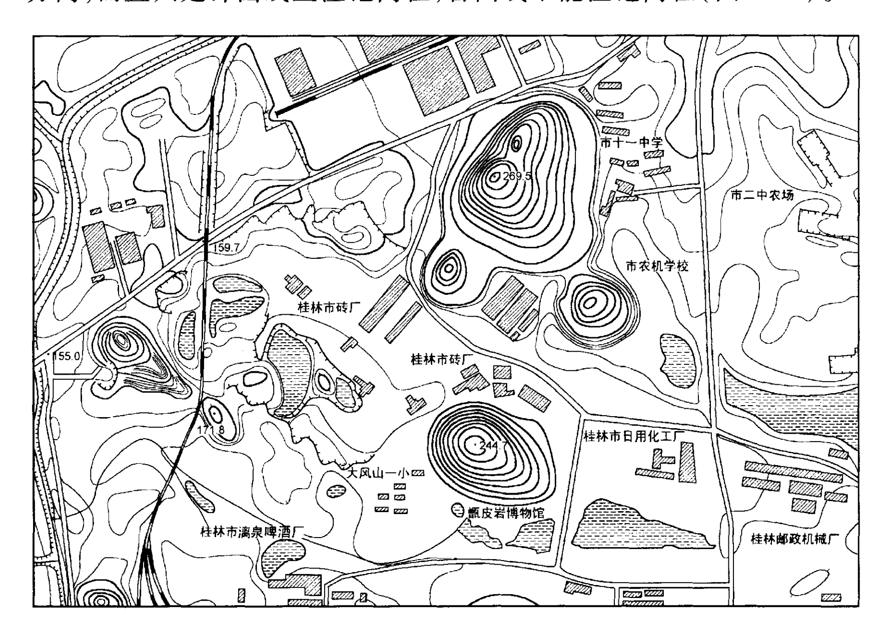


图 4.21　桂林甑皮岩遗址及周边环境地形图

4.8　地形图在考古工作中的应用

4.8.1　确定地面点的高程、经纬度与坐标

确定地面点的高程时，假如点的位置恰好在图中等高线上，那么只需确定这根等高线的高程就可以了，如图 4.22 中的 a 点，因为等高距 $h=20$ 米，a 点的高程为 180 米。对于等高线之间的 b 点，则首先画出通过 b 点的最短线段 mn，再确定 bn 占整个线段 mn 的比例，bn / mn = 0.4，b 点的高程应为

$$140\ 米 + 0.4\times20\ 米 = 148\ 米。$$

确定地面点经纬度与坐标的方法基本类似。图 4.23 是 1∶50000 地形图的图框，其中最外层是经纬度注记，最小分划是 1′；往内较宽的是坐标格网的注记，最小分划是 1 公里，并且有公里数的注记。在确定 A 点的经度时，首先通过 A 点作相同经度连线（如图 4.23 中上下图框内经度 117°16′连线）的平行线，量出 ma 与 mn 的长度，然后计算出 ma 在 1′的长度（mn）中所占的比例 ma / mn = 0.3117，最后计算出 A 点的经度为

$$117°16' + 0.3117\times60'' = 117°16'18.7''$$

类似的方法可以计算 A 点的纬度与坐标值。在确定 A 点的坐标时，应该沿着坐标格网的方向作平行线。

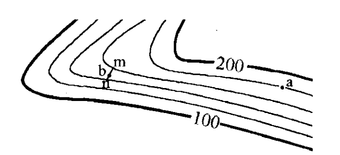


图 4.22　根据等高线确定点的高程

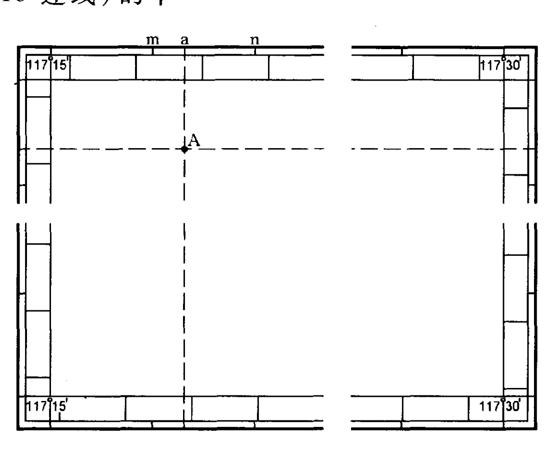


图 4.23　确定点的经纬度

4.8.2 根据点的经纬度与坐标值在地形图上进行标绘

在田野调查等工作中，可以使用全球定位系统测量考古遗迹的经纬度或坐标，然后根据这些经纬度或坐标数值，在地形图上进行标绘。标绘的方法与上述确定点位经纬度与坐标的方法正好相反，即根据经纬度数值标绘时，先分别计算出经度与纬度的秒数在1′的小格中所占的长度，然后分别在图框上下的相应小格中标绘经度值，左右的相应小格中标绘纬度值，最后相互连接，得到交叉点即可。

根据坐标标绘时，以坐标隔网为标准进行标绘。

4.8.3 绘制地形图上已知方向的横断面图

横断面图在研究墓葬的封土情况、遗址沿山坡的分布特征等考古工作中很有意义，所以经常需要根据遗址的地形图来绘制其一定方向的横断面图。

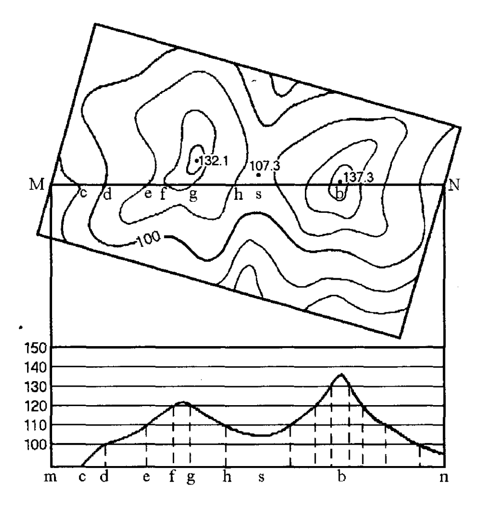


图 4.24 根据等高线绘制剖面图

为了绘制图4.24中MN连线的横断面图，先画直线mn平行于直线MN，再从地形图上将MN与各等高线的交点c、d、e…，以及MN所经的各地形特征点如山头b和鞍部s等分别向mn作垂线，得c、d…诸点。画平行于mn的一组平行线，使其间隔相等，并分别标以相应等高线的高程。将这些平行线与各垂线的交点用平滑的曲线连接，就成了所作的横断面图。

在此应该强调的是所画的直线mn应该平行于直线MN，表示不同高程的平行线的间隔应该根据原地形图的等高距与比例尺来计算，这样绘制出来的横断面图与原地形图具有相同的比例尺，而且真实地反映地表的起伏情况。有时候地面起伏不大，为了更好地显示地表的起伏状态，可以加大这组平行线相互之间的间隔。

4.8.4 编绘考古遗迹分布图

考古遗迹分布图属于专题地图，除了考古遗迹的情况外，其他内容应该尽量简化。所以根据普通地形图编绘遗迹分布图时，一般会保留全部的等高线与水系，道路则根据情况而定，居民地需要进行合并与简化，每个村庄只需保留几条主要街道，其他与考古遗迹没有什么关系的内容都可以省略。考古遗迹需要加重表现，这样才能够主题鲜明，重点突出(图4.21)。

第五章　电子全站仪测图

5.1　电子全站仪概述

电子全站仪是一种新型的测量仪器,它同时具备了电子经纬仪和光电测距仪的功能,由机械、光学、电子元件组合而成的测量仪器,能够方便、快捷地进行角度(水平角、垂直角)测量和距离(斜距、平距、高差)测量,能够自动显示、记录、存储各种数据,并能进行数据处理,可以在野外直接获取被测点位的坐标和高程。所以只要安置一台仪器,就可以完成在该测站上所有的测量工作,因此被称为"全站仪"。配置相应的软件,可以将电子全站仪与计算机进行联机作业,将观测数据直接传输到计算机中,由软件自动编辑和绘制数字地图,再通过绘图仪按一定的比例尺打印输出所测的图形,或者调入地理信息系统软件中作为基础数据使用。

电子全站仪已广泛用于控制测量、细部测量、施工放样、变形观测等方面的测量作业中。所以电子全站仪的使用,提高了外业测量的效率和绘图精度,简化了作业流程,可以同时提供线划图、数字地面模型等多种图形产品。

5.1.1　电磁波测距的原理

卷尺丈量距离的工作量十分繁重,测量精度低,而且受很多野外条件的限制。为了提高距离测量的速度和精度,20 世纪 40 年代末出现了光电测距仪。60 年代初,随着激光技术的出现及电子技术和计算机技术的发展,各种类型的光电测距仪相继出现,距离测量工作得到了彻底的改变。

电磁波测距是利用电磁波(微波、光波)作载波,在其上调制测距信号,测量两点间距离的方法。若电磁波在测线两端往返传播的时间为 t,则可求出两点间的距离 D:

$$D = ct/2 \qquad (c\ 为电磁波在大气中的传播速度)$$

电磁波测距仪具有测量速度快，方便，受地形影响小，测量精度高等特点，已逐渐代替常规测距的方法。电磁波测距原理有两种：

1. 脉冲法测距

脉冲式光电测距仪一般采用固体激光器作为光源，由测站点的激光脉冲发射器发射出一束光脉冲（主波脉冲），到达目标点的反射镜后再反射回来（回波脉冲），为了测定光波往返的时间，将主波脉冲和回波脉冲先后送入“门”电路，分别控制“电子门”的“开启”和“关闭”。同时由时标振荡器不断地产生具有一定时间间隔了的电脉冲（时标脉冲）。测距时，在光脉冲发射的同一瞬间，主波脉冲把“电子门”打开，时标脉冲一个一个地通过“电子门”进入计数系统，当反射回来的光脉冲到达测距仪时，回波脉冲立即把“电子门”关闭，时标脉冲就停止进入计数系统，根据时标脉冲次数以及单个脉冲的时间间隔，就可以得到光脉冲往返两点之间的时间，于是得到两点之间的距离，并通过数码管在测距仪上显示出来。

2. 相位法测距

在工程中使用的红外测距仪，都采用相位法测距原理。它是将测量时间变成测量光在测线中传播的载波相位差，通过测定相位差来测定距离，称为相位法测距。

红外测距仪采用砷化稼（GaAs）发光二极管作为光源，发射红外光的光强会随着输入电流的大小发生变化。针对具体的红外测距仪，发射红外光的波长为特定的数值。由于光波在空气中的传播速度与大气温度、气压有关，所以仪器设计时确定了标准温度和标准气压，在测距时需要测定测线的温度和气压，并且输入到测距仪中，对所测距离进行温度和气压改正。

相位法红外测距仪采用特定的高频信号对发光二极管进行调制，使光强发生周期性的明暗变化，这样的调制光被测线另一端的反射镜反射回来，接收器接收后由相位计将发射信号与接收信号进行相位比较，间接地计算出光线的往返传播时间，再计算出两点间的距离。相位计只能检测出不足一个整周期的相位差，而不能测出整周期数量，所以与频率密切相关的红外光波长便成为一台测距仪往返测程的标准，即波长一半的距离称为“光尺”，如果光尺长为 1 米，只能测出小于 1 米的距离；光尺长 1 公里时，只能测出小于 1 公里的距离。测距仪的测相精度一般为 1/1000，1 公里的光尺精度只有米级，光尺越长，精度越低。

为了同时兼顾测程和精度，目前测距仪常采用多个调制频率（即 n 个光尺）进行测距。用短光尺测定精确的小数，用长光尺测定距离的大数。将两者结合起来，就解决了长距离测距数字直接显示的问题。

5.1.2 测距边长改正计算

测距仪测得的倾斜距离，必须经过仪器常数改正、气象改正、倾斜改正等，才能计算出两点间正确的水平距离。

1. 仪器常数改正

仪器常数有加常数和乘常数两项，现代测距仪都具有设置仪器常数的功能，测距前预先设置常数，在仪器测距过程中自动改正。加常数是由发光管的发射、接收等器件产生的，一般在仪器出厂时预置在仪器中，但是由于仪器在搬运过程中的震动、电子元件的老化，常数还会发生变化，使用前需要对仪器进行检定，再对测量结果加以改正。此外，不同型号的反光镜常数也不一样。若更换反光镜要进行加常数重新测试。

仪器经过一段时间的使用，晶体会老化，致使测距时仪器的晶振频率与设计频率有偏移，产生与测试距离成正比的系统误差。其比例因子称为乘常数。此项误差也应通过检测求定，在所测距离中加以改正。

2. 气象改正

仪器的光尺长度是在特定的气象条件下设定的，在野外工作时气象条件与仪器的标准气象条件往往不一致，使测距值产生系统误差。所以在测距时，应同时测定环境温度（读至 1℃）和气压（读至 1 毫米汞高），利用仪器生产厂家提供的气象改正公式计算距离改正值，或者将温度和气压输入到测距仪中，在测距过程中自动改正。

3. 倾斜改正

测距仪测量结果经过前几项改正后的数值，是测距仪几何中心到反光镜几何中心的斜距，要改算成平距还应进行倾斜改正。现代测距仪一般都与光学经纬仪或电子经纬仪组合，测距时可以同时测出竖直角或天顶距，输入到测距仪中，自动计算出高差和水平距离，或者根据三角函数关系进行计算。

5.1.3 电子全站仪的特殊部件及其功能

作为一种新型的测量仪器，电子全站仪安装了一些具有特殊功能

的部件,在此对它们作一些简略的介绍。

5.1.3.1 同轴望远镜

望远镜用于观察远方物体和精确瞄准目标,由物镜、目镜、调焦透镜和十字丝分划板组成,如图 5.1 a 所示。物镜和目镜一般采用复合透镜组,调焦镜为凹透镜,位于物镜和目镜之间。图 5.1 b 是望远镜成像原理图。

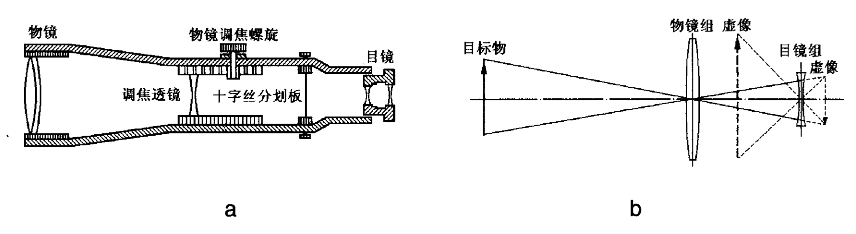


图 5.1 望远镜的结构与光学原理

十字丝分划板主要是一块薄玻璃板,用四个螺丝安装在望远镜筒上,起物镜成像面的作用,玻璃板上刻有十字丝(图5.2)。十字丝分划板上竖直的一条长线称竖丝,与之垂直的长线称为横丝,用来瞄准目标。竖丝与横丝有一半是单线,另一半是双线,瞄准细小目标时可以将目标置于双线中间,瞄准较大目标时可以用单线将目标平分,以便准确地照准目标。十字丝的中心与物镜光心的连线构成望远镜的照准轴(视准轴),是全站仪精确瞄准目标的轴线。

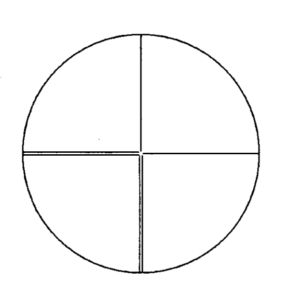


图 5.2 十字丝分划板

调焦透镜是一块凹透镜,其作用是使物镜生成的像清晰地显现在十字丝分划板上。调焦透镜装置在望远镜筒内的一个金属筒上,金属筒与望远镜筒外壳上的调焦螺旋连接,转动调焦螺旋,调焦透镜在望远镜筒内会产生纵向滑动。使远近不同的物体成像于十字丝分划板上的操作,称为物镜调焦(物镜对光)。在进行物镜调焦之前,首先应该进行目镜调焦(目镜对光),使十字丝非常清晰,然后才进行物镜调焦。

目镜调焦的方法是:将望远镜指向天空或远方或浅色物体,然后逐渐旋进或旋出目镜,直到看清十字丝且丝的颜色愈黑愈好。

全站仪的望远镜中,瞄准目标用的视准轴和光电测距的红外光发

射、接收光轴是同轴的。在物镜与调焦透镜中间设置分光棱镜系统，使它可以接收目标发出的光线，在十字丝分划板上成像，测角时进行瞄准；又可使光电测距部分的发光二极管射出的调制红外光经物镜射向目标棱镜，并经同一路径反射回来，由光敏二极管接收（称为外光路），同时还接收在仪器内部通过光导纤维由发光二极管传来的调制红外光（称为内光路），由内、外光路调制光的相位差计算所测得的距离。

全站仪望远镜是测角瞄准与测距光路同轴的，因此，一次瞄准目标棱镜（反光棱镜装置于觇牌中心），即能同时测定水平角、垂直角和斜距。望远镜也能作360°纵转，通过直角目镜，甚至可以瞄准位于天顶的目标，并可测得其垂直距离（高差）。

5.1.3.2　键盘

全站仪的键盘是测量时操作指令和数据输入的部件，键盘上的键分为硬键和软件键（简称软键）两种。每一个硬键有一固定的功能，或兼有第二、第三功能；软键与屏幕最下一行显示的功能菜单或子菜单相配合，使一个软键在不同的功能菜单下有许多种功能。

5.1.3.3　双轴倾斜传感器

如果全站仪没有严格整平，使仪器纵轴倾斜，就会引起角度观测的误差，而且不能从盘左、盘右观测中得以抵消。双轴倾斜传感器经常监视着纵轴的倾斜，并通过微处理器在度盘读数中自动改正。倾斜超过一定限度时，仪器会停止测量工作，必须重新进行手工整平。

纵轴倾斜可以发生在任何方向。所谓“双轴”，是指定仪器的视准轴的水平投影方向为 X 轴、仪器的横轴方向为 Y 轴。由传感器测定的纵轴倾斜分别以 X 轴和 Y 轴方向的倾斜角度来表示。这样，一方面可以据此进一步精确地整平仪器；另一方面，即使暂不整平，也可通过微处理器自动按倾角改正水平度盘的读数显示，实现所谓纵轴倾斜的自动补偿。

5.1.3.4　存储器

全站仪的存储器把野外测量数据先在仪器内存储起来，然后传送到计算机等设备中进行处理，分为机内存储器和存储卡两种。

1. 机内存储器

机内存储器相当于计算机中的内存（RAM），利用它来暂时存储或读出测量数据，其容量的大小随仪器的类型而异，较大的内存可以存储3000个点的观测数据。现场测量所必需的已知数据也可以放人内存。

经过接口线将内存数据传输到计算机以后,可以将其清除。

2. 存储卡

存储卡的作用相当于计算机的磁盘,用作全站仪的数据存储装置,卡内有集成电路、能进行大容量存储的元件和运算处理的微处理器。一台全站仪可以使用多张存储卡。通常,一张卡能存储大约1000个点的距离、角度和坐标数据。

将测量数据存储在卡上后,就可以在室内处理测量数据。同样,在室内将坐标数据等存储在卡上后,送到野外测量现场,就能使用卡中的数据。

5.1.3.5 通讯接口

全站仪可以将内存中的存储数据通过BS-232C接口(计算机串口)和通讯电缆传输给计算机,也可以接收由计算机传输来的测量数据及其他信息,称为数据通讯。

通过接口和通讯电缆,使原本在全站仪键盘上进行的操作,也同样可以在计算机的键盘上操作,便于用户应用开发,即具有双向通讯功能。

5.1.3.6 水准器

水准器是根据液体受重力作用后气泡居于最高处的特性,使水准器的一条特定的直线处于水平或竖直位置的一种装置。

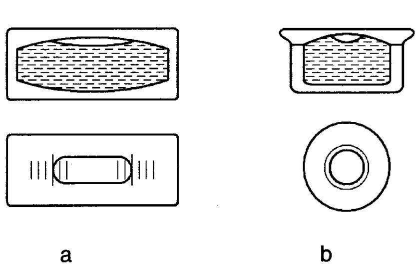


图5.3 管水准器与圆水准器

很多全站仪上同时安装有管水准器和圆水准器两种。管水准器用来精确整平仪器,圆水准器用来初步整平仪器。管水准器又称水准管,是一个内装液体并留有气泡的密封玻璃管。其纵向内壁磨成圆弧形,外表面刻有2毫米间隔的分划线,2毫米所对的圆心角称为水准管分划值,水准管圆弧半径愈大,分划值就越小,则水准管灵敏度就越高,也就是仪器置平的精度越高(图5.3 a)。

全站仪上还装有一个圆水准器(图5.3 b),其顶面的内壁被磨成球面,刻有圆分划圈。通过分划圈的中心(即零点)作球面的法线,称为圆水准器轴。圆水准器分划值约为8′。当气泡居中时,圆水准器轴竖直,则仪器达到初步整平,竖轴亦处于基本竖直的位置。

5.1.4 电子全站仪的特性

目前最新推出的全站仪一般都具备(或部分具备)如下一些功能和特性:自检与改正功能、双向传输功能、程序化特性、特殊性、统一性和开放性。

1. 自动检测与改正功能

电子全站仪在轴系关系方面与光学经纬仪并没有太多的区别,但由于全站仪自检功能和软件功能的完善,在一定的误差范围内,仪器可以将校正后的轴系残留误差通过软件加以改正,从而使观测得到的结果不含轴系残留误差。因此,现今全站仪的工作稳定性和精度要比光学经纬仪高很多。

2. 双向数据传输功能

计算机和全站仪之间的通信不仅仅是指计算机从全站仪中接收数据,通常计算机也可向全站仪传输数据、编码及程序,或由计算机实时控制全站仪的工作状态。随着全站仪的发展,软件已渐渐从硬件的限制中摆脱出来,使全站仪在不必更换任何电子元件的条件下,功能会有所增加。

3. 程序化特性

现在的全站仪内存中存储着一些常用的测量作业程序,野外工作时可以按照仪器的设定进行观测,随时可以得到所需要的结果,如很多全站仪具有坐标测量、悬高测量、偏心测量等等程序。使用这些程序能极大地提高作业效率。

4. 特殊性

为了满足测量工作中一些特殊的作业要求,现今推出的一些全站仪从结构上来说有一些特殊性。如带伺服马达的全站仪可设置自动跟踪目标功能,或设置自动放样功能,甚至实现测站无人值守,由目标站来遥控测站。

5. 统一性和开放性

统一性是指仪器间具备统一的存储介质(数据载体)、统一的数据接口和统一的数据格式;开放性是指由于仪器具备了统一性的条件,故能够达到相互间的开放,即仪器之间的数据交换与共享。同时,“统一性”使用户也易于加入到仪器软件开发的行列,让仪器按照用户的特殊工作顺序和要求进行作业,实现对用户的开放。

总之，电子全站仪不仅是野外数字测图的主要仪器，而且使用范围不断扩大，可以承担全部的野外测量工作。

5.1.5 电子全站仪的安置

进行任何一项观测之前，必须把全站仪安置在测站上，其中包括对中与整平两项工作。

1. 对中

对中是将仪器的中心安置在测站点上，使仪器中心与测站点标志中心在同一铅垂线上。对中的方法是：先打开三脚架，放在测站点上，使脚架头大致水平，架头的中心大致对准测站标志，同时注意脚架的高度要适中，以便观测。此时应该挂上垂球，移动三脚架，使垂球尖大致对准地面标志，然后踩紧三脚架，如果垂球仍然对准地面标志，就可以装上仪器，旋紧中心螺旋，使仪器稳固。

安放三脚架时，如果地面平坦，三脚架的三条腿可以保持相同的长度。如果在斜坡上安置三脚架，应该使一条腿稍短，并且安放在上坡方向，两条较长的腿安置在下坡方向，确保三脚架具有足够的稳定性。

2. 整平

整平是使仪器的竖轴竖直，即使水平度盘安置成水平位置。很多全站仪上都同时安装了圆水准器和管水准器，可以首先使用圆水准器作初步整平，再使用管水准器进行精确整平，也可以直接使用管水准器进行整平。如果全站仪上只有圆水准器，表明该仪器具有很强的倾斜自动改正功能，那么只要使气泡居中就可以操作仪器。

使用管水准器整平的方法是：如图 5.4 a 所示，先转动全站仪的照准部，使水准管轴平行于任意两个脚螺旋 1、2 的连线，按相反方向同时旋转脚螺旋 1、2，使水准管气泡居中；将照准部旋转 90°，单独用脚螺旋 3 引导水准管气泡居中，如图 5.4 b。这两步操作往往会相互影响，因此整平工作要反复进行，直到水准管气泡在任何方向都居中为止。

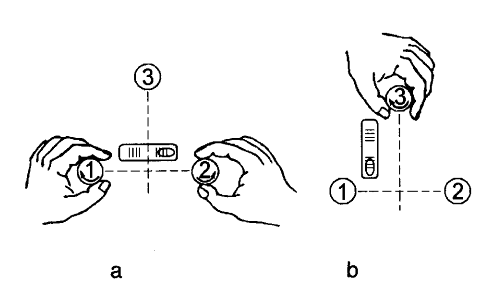


图 5.4 利用脚螺旋整平仪器的方法

在整平工作中，可以遵循左手规则：不论进行初步整平还是精确整平，如果让气泡从

右往左移动，则左手往外旋转；如果让气泡从左往右移动，则左手往内旋转。同时旋转两个脚螺旋的时候，右手则始终按照与左手相对的方向旋转大致相等的角度。

3. 精确对中和整平

全站仪安置水平后，应该从光学对中器中观察控制点中心标志，检查对中器中心点是否与控制点标志中心重合。如果没有重合，需要松动仪器的中心螺旋，在三角架顶部平移（不可旋转）全站仪使其精确对中。然后再用管水准器整平仪器，并通过光学对中器再次检查精确对中的情况。

光学对中器也是一个望远镜，需要进行目镜和物镜调焦，目镜调焦的目的是看清其中的一个圆圈和中心黑点，物镜调焦则是使地面标志清晰，以便进行比较。

4. 在使用电子全站仪的过程中，应该注意如下事项：

（1）操作时只用手指接触仪器，观测时双手不要扶持仪器或三脚架。

（2）避免在高粉尘，无良好排风设备或靠近易燃物品环境下使用仪器，以免发生意外，避免强烈震动。

（3）不能自行拆卸和重装仪器，以免影响测量精度。

（4）不得直接用望远镜观察太阳，以免造成眼睛失明。

（5）不能用望远镜观察经棱镜或其他反光物体反射的阳光，以免损伤视力。

（6）在免棱镜测量状态下，不能从正面观察望远镜中的激光束。同时要防止激光束照准他人面部。

5.2 拓普康 GTS-211D/GPT-2005 电子全站仪

5.2.1 各部件名称与功能

拓普康（TOPCON）GTS-211D 电子全站仪的外形和各部件的名称如图 5.5 所示，两面都具有操作按键和显示窗，使用方便，可以进行角度、距离、坐标、偏心、悬高和对边测量，还能够进行数据采集、传输与存储。GTS-211D 可以自动进行水平和垂直改正，补偿范围为 ±3′，测角精度 ±5″，测距精度 ±(3 + 2ppm × D) 毫米，单棱镜测程 1.2 公里，三

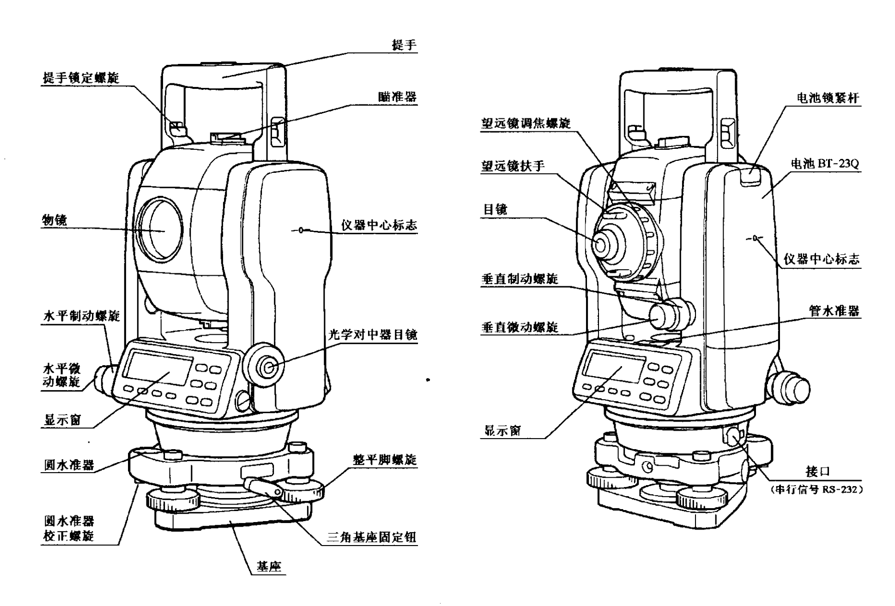


图 5.5　拓普康(TOPCON)GTS-211D 电子全站仪

棱镜测程 1.8 公里。其中 ppm 表示测量距离 D 的百万分之一,如测量 1 公里的距离时,还会增加 1 毫米的误差。仪器内有自动记录装置,可记录 2400 个测量点;测量数据还可以通过 BS-232C 接口与计算机进行数据通讯。

GTS-211D 的操作面板上只有 10 个操作键(如图 5.6),通过这些操作键可以实现野外测量工作中需要的各种功能,其中包括电源开关、测量模式选择、翻页、字母与数字的输入等等。仪器的两个操作面板完全相同。各个操作键的功能见表 5.1,其中距离测量模式键会有两种切换的模式,显示不同的测量结果。

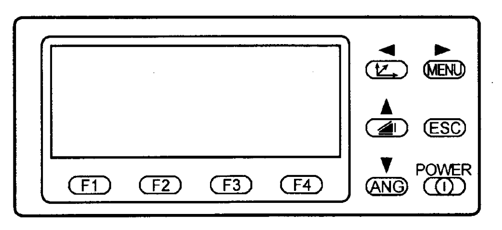


图 5.6　拓普康 GTS-211D 的操作面板

表 5.1　操作键的名称和功能

键	名　称	功　　能
	坐标测量模式	进行坐标测量,显示被测点的三维坐标
	距离测量模式	进行距离测量,显示水平距离、垂直距离和高差或者显示水平角、竖直角和倾斜距离
ANG	角度测量模式	进行角度测量,显示水平角、竖直角
MENU	菜单键	显示或设置仪器中各种功能的菜单
ESC	退出键	返回到前一模式或前一显示状态 从正常测量模式直接进入数据采集模式或放样模式
POWER	开关键	电源开关键 ON/OFF
F1 ~ F4	软　键	功能参见所显示的信息
0 ~ 9	数字键	输入数字(通过 F1 ~ F4 的特定功能输入数字)
A ~ Z	字母键	输入字母(通过 F1 ~ F4 的特定功能输入字母)
ENT	回车键	每次输入结束按此键确认(一般是 F4 软键)

显示窗使用液晶显示(LCD)点阵,可显示 4 行,每行 20 个字符,通常前三行显示测量数据,最后一行显示随测量模式变化的按键功能。显示窗的对比度和照明都是可以调节的。显示窗中常见的显示符号的内容见表 5.2 所示。

表 5.2　常见显示符号的内容

显　示	内　容	显　示	内　容
V	垂直角	E	东向坐标
HR	右水平角	Z	高程
HL	左水平角	*	EDM(电子测距)正在工作
HD	水平距离	m	以米单位
VD	高差	ft	以英尺单位
SD	斜距	fi	以英尺和英寸单位
N	北向坐标		

功能键(软键)的有关信息显示在最底行,显示的模式如图 5.7 所示,各功能键在角度测量、距离测量和坐标测量模式中的功能见表 5.3 所示。

表 5.3 软键的名称和功能

模式	页码	软键	显示符号	功能
角度测量	1	F1	0SET	水平角设置为 0°00′00″
		F2	HOLD	锁定水平角
		F3	HSET	通过键入数字设置水平角
		F4	P1↓	显示第 2 页软键功能
	2	F1	TILT	设置倾斜改正是否显示,选择 ON 时显示倾斜改正数
		F2	REP	重复角度测量模式
		F3	V%	垂直角百分比坡度(%)模式
		F4	P2↓	显示第 3 页软键功能
	3	F1	H-BZ	对每隔 90°水平角设置蜂鸣声的开启与关闭
		F2	R/L	变换水平角的左/右旋转计数方向
		F3	CMPS	变换天顶距/高度角
		F4	P3↓	显示第 1 页软键功能
距离测量	1	F1	MEAS	开始测量
		F2	MODE	设置测量模式:精测/粗测/跟踪
		F3	S/A	设置棱镜参数、大气改正数、温度、气压
		F4	P1↓	显示第 2 页软键功能
	2	F1	OFSET	距离偏心测量模式
		F2	S. O	距离放样测量模式
		F3	m/f/i	米、英尺或者英尺、英寸单位的变换
		F4	P2↓	显示第 1 页软键功能
坐标测量	1	F1	MEAS	开始测量
		F2	MODE	设置测量模式:精测/粗测/跟踪
		F3	S/A	设置棱镜参数、大气改正数、温度、气压
		F4	P1↓	显示第 2 页软键功能
	2	F1	R. HT	通过输入设置棱镜高度
		F2	INS. HT	通过输入设置仪器高度
		F3	OCC	通过输入设置测站点坐标
		F4	P2↓	显示第 3 页软键功能
	3	F1	OFSET	坐标偏心测量模式
		F2	S. O	坐标放样测量模式
		F3	m/f/i	米、英尺或者英尺、英寸单位的变换
		F4	P2↓	显示第 1 页软键功能

串行信号 RS-232C 接口用于连接电子全站仪和计算机或拓普康公司数据采集器,以使计算机能够从全站仪接收到数据或发送预置数

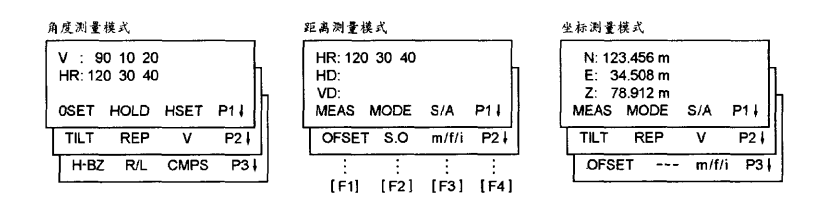


图 5.7 拓普康 GTS-211D 的功能键

据(如水平角等)到全站仪。各种数据都可以根据软件的需要,以不同的模式输出到计算机中。

在测量过程中,选择不同的模式就会输出相应的数据,具体输出数据的情况为:

(1) 角度模式 (V、HR 或 HL) :V、HR (或 HL);

(2) 水平距离模式 (HR、HD、VD):HR、HD、VD;

(3) 斜距模式 (V、HR、SD):V、HR、SD;

(4) 坐标模式(N、E、Z):N、E、Z。

5.2.2 测量准备

1. 安装仪器时需要进行精确整平和对中。拓普康 GTS-211D 上配置有圆水准器和管水准器,分别用于初步整平和精确整平,并且通过光学对中器进行精确对中。

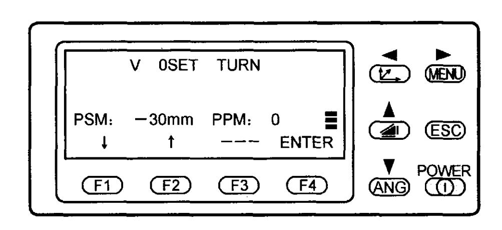


图 5.8 拓普康 GTS-211D 的开机状态

2. 按压 POWER 键,即可开机,首先进行初始化约 2 秒,然后显示零指标设置指令(0SET)、当前的棱镜常数(PSM)和大气改正值(PPM),以便确认所使用的棱镜常数(图 5.8)。

3. 此时按压[F1](↓)或[F2](↑)键,可以进行显示屏对比度调节,为了在关机后保存设置值,需再按压[F4](ENTER)键。

全站仪的垂直度盘上装有电子基准,转动望远镜,传感器通过该基准时,仪器自动设置垂直角为 0°00′00″,并发出轻微的声音,同时开始角度测量工作。

4. 开机后,电池现存容量在显示窗的右侧通过一至三条短粗线显

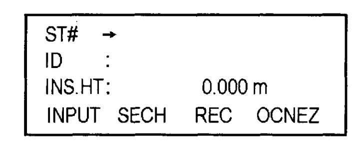
示，只显示一条短粗线或短粗线闪烁时表示能量不足，需要更换电池；不能测量时显示(Battery Empty)。使用专用充电器充电，充电前应该按压放电钮进行放电，充电时间约1.5小时。

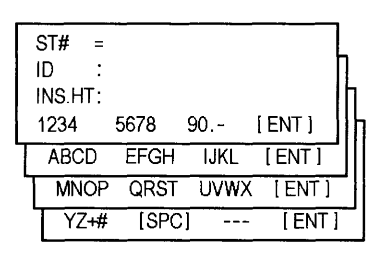
拆卸电池时，向下压电池顶部的锁杆，再向外拉出即可。安装电池时，先将电池底部安装到主机上，再向仪器侧面推拢电池，此时另一只手扶住仪器的另一侧，直到发出"喀嚓"一声。

5. 在测量工作中，当输入仪器高、棱镜高、测站点号、后视点号等参数时，需要输入字母和数字。输入字符时：(1) 用[▲]或[▼]将箭头移动到需要输入的条目；(2) 按[F1](INPUT)键，箭头变为等于号(=)，同时底行显示字符；(3) 按[▲]或[▼]键选择另一页；(4) 按软功能键选择某一组字符；(5) 再按软功能键选择某一个字符；(6) 按[F4](ENT)键，箭头移动到下一个条目。

例如图5.9中，按[F2]键选择(QRST)，再按[F3]键选择(S)，即可输入字符"S"。

修改某个字符时，用[▲]或[▼]键将光标移动到要修改的字符上，再按输入键进行操作。





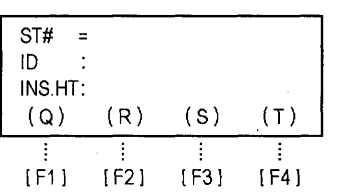


图5.9　输入字符方式

5.2.3　角度测量模式

1. 水平角右角和垂直角的测量极为简单，首先确认处于角度测量模式，并进行目镜调焦、物镜调焦后，再照准目标(十字丝与反射棱镜中心重合)，显示窗即可显示出读数(图5.10)。如果需要设置某一目标的水平角为0°00′00″，则需精确照准起始方向的目标后，按压[F1]

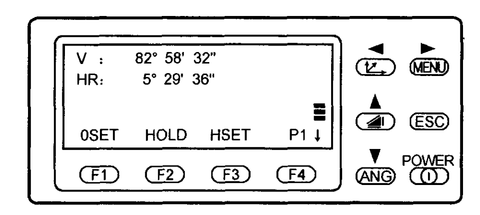


图5.10　角度测量模式

(0SET)键,再按压[F3](YES)进行确认。

2. 水平角右角/左角的切换,是在角度测量模式[ANG]下,按压[F4](↓)两次转到第三页,再按压[F2](R/L)键即可进行HR和HL切换。

3. 水平角设置方式还有两种情况:(1) 通过锁定角度值进行设置时,首先用水平微动螺旋设置所需要的水平角,然后按压[F2](HOLD)键锁定水平角,此时转动仪器水平角不会变化。再照准目标后,按压[F3](YES)键完成锁定水平角,显示窗返回正常的角度测量模式。(2) 通过键盘输入进行设置时,首先照准目标,按压[F3](HSET)键,通过键盘输入所要求的水平角,随后即可进行正常的测量。水平角输入时,水平角的度数按整数位直接输入,分值是小数点后一、二两位数,秒值是小数点后三、四两位数,如输入132°16′52″时,只是输入132.1652即可。

在角度测量模式下,可以进行角度复测,水平角在90°、180°、270°附近蜂鸣声的设置,以及垂直角与百分比(坡度)切换、天顶距与高度角切换等工作。

5.2.4 距离测量模式

距离测量时理论上应该设置大气改正值,该值可以通过测量温度和气压求出。同时还需要设置棱镜常数,拓普康的棱镜常数一面为0,不需设置;但是如果把棱镜安装在棱镜架另外一面的时候则变为-30,棱镜架上一般都标注有棱镜常数。如果使用其他厂家生产的棱镜,使用之前应该设置棱镜常数,棱镜架上没有标注时应该首先检测棱镜常数。棱镜常数设置后,关闭电源也仍然保存。

测量过程中可以选择精测模式、跟踪模式和粗测模式,精测模式是一般的测量模式,显示的最小单位是1毫米,测量时间大约2.5秒;跟踪模式的最小显示单位是10毫米,测量时间为0.3秒;粗测模式的最小显示单位是10毫米或1毫米,测量时间为0.5秒。选择方式是在距离测量模式下,按压[F2](MODE)键,再按压[F1](FINE)、[F2]

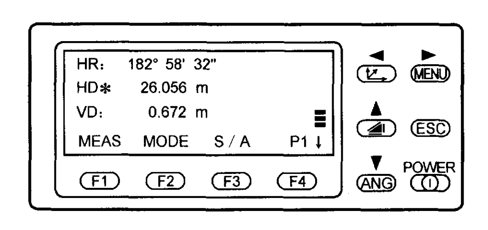


图5.11 距离测量模式

(TRACK)或[F3](COARSE),即可设置成合适的测量模式。

距离测量是在角度测量模式下,照准棱镜中心,按压距离测量模式[◢]键即可开始工作,显示窗从上往下显示水平角 HR、水平距离 HD 和垂直距离 VD(图5.11)。如果再按一次距离测量模式[◢]键,显示内容改变为水平角 HR、竖直角 V 和倾斜距离 SD。当光电测距(EDM)正在工作时,显示窗 HD 右边会有"*"显示,表示连续测量模式,此时按压[F1](MEAS)即可变成单次测量模式,再按压[F1]则又变为重复测量模式。一般设为单次测量,以节约用电。

5.2.5 坐标测量模式

在进行坐标测量工作之前,需要在坐标测量模式第二页设置测站点坐标(OCC:N0、E0、Z0)、仪器高(INS. HT)、和目标高(棱镜高)(R. HT)(图5.12)。瞄准未知点上的棱镜并测量之后,仪器就会自动转换和显示未知点(棱镜点)在该坐标系统中的坐标。仪器关闭之后,测站点坐标、仪器高和棱镜高等数值仍能保存。上述数值没有输入时,全部以 0 计算。

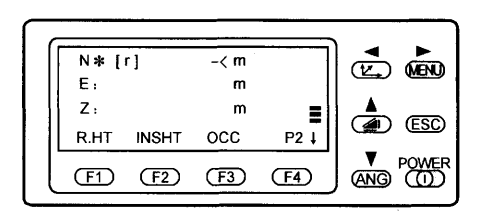


图 5.12 坐标测量模式

进行测量之前,还需要设置测站点与另一已知点(后视点)连线的方向角(照准后视点上的棱镜,通过角度测量模式下的 HSET,设置其水平角),再照准未知点上的棱镜,按压坐标测量模式[⌙]键开始工作,显示窗将显示测量结果,即棱镜点的三维坐标(N、E、Z)。

5.2.6 特殊测量模式

5.2.6.1 悬高测量(REM)

为了测量无法架设棱镜点的高度,可以先将棱镜架设在目标点的垂直下方,如图 5.13。

1. 按[MENU]键,再按[F4](P↓)翻页,再按[F1](PROGRAMS)键,选择(REM)进入悬高测量模式。
2. 按[F1](INPUT R. HT)键,输入棱镜高。
3. 照准棱镜,按[F1](MEAS)键开始测量,显示窗显示仪器至棱

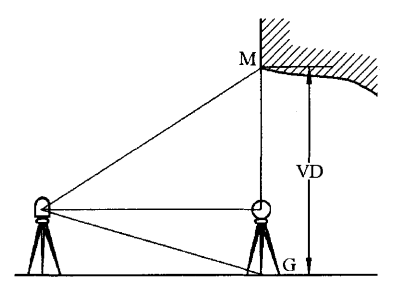


图 5.13 悬高测量原理

镜的水平距离。

4. 按[F4](SET)键,确定棱镜位置。此时随着照准位置的升高,显示的垂直距离 VD 数值不断变化。直到照准目标 M,显示出架设棱镜点 G 至 M 点的高差。

然后按[ESC]键,返回正常的测量模式。

5.2.6.2 偏心测量(OFSET)

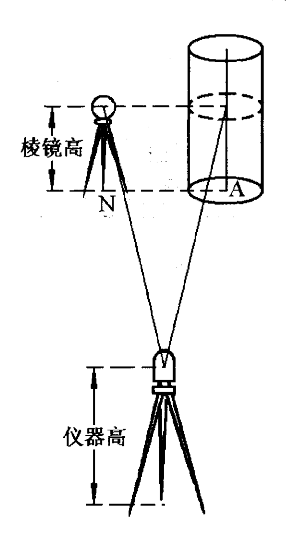


图 5.14 偏心测量原理

当需要测量无法架设棱镜的目标点(如石柱中心)时的坐标或距离时,可以采用偏心测量模式(图 5.14)。为了测量 A 点的坐标或其与测站点的距离,在仪器与 A 点水平距离相等的 N 点架设棱镜,输入仪器高和棱镜高。

1. 在距离测量模式下,按[F4](P1↓)键翻页,再按[F1](OFSET)键进入偏心测量模式。

2. 照准棱镜,按[F1](MEAS)键开始测量,显示窗显示仪器至棱镜的水平距离。

3. 按[F4](SET)键,确定棱镜位置。

4. 只用水平制动和水平微调螺旋照准 A 点,每按一次距离测量模式[◢]键,仪器至 A 点的水平距离 SD 和高差 VD 会重复显示。

5. 如果设置了测站点的坐标,照准 A 点后,每按一次坐标测量模式[⊾]键,显示窗依次显示 N、E、Z 坐标值。

5.2.6.3 对边测量(MLM)

对边测量是测量两个棱镜点之间的水平距离 dHD、倾斜距离 dSD 和高差 dVD。MLM 模式有两种功能:MLM-1(A-B,A-C),MLM-2(A-B,B-C)(图 5.15)。

1. 按[MENU]键,再按[F4](P↓)翻页。

2. 按[F1](PROGRAMS)键,再按[F2](MLM),再按[F1](MLM-1)。

3. 照准 A 点棱镜，按 [F1]（MEAS）键，显示仪器至棱镜点 A 的水平距离 HD。

4. 按[F4]（SET）键，确定棱镜位置。再照准 B 点棱镜，按 [F1]（MEAS）键，显示仪器至棱镜 B 点的水平距离 HD。

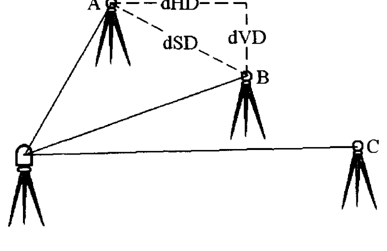


图 5.15　对边测量原理

5. 按[F4]（SET）键，显示 A、B 两点棱镜之间水平距离 dHD 和高差 dVD。

6. 按[◢]键显示 A、B 之间的倾斜距离 dSD。

7. 按[F3]（HD）键，可测量 A、C 之间的距离（按[ESC]键，返回前一模式）。

照准 C 点棱镜，按[F1]（MEAS）键，再重复（5）、（6）即可。

5.2.7　工作模式设置

在角度测量、距离测量和坐标测量模式下，设置的作业模式（或参数）关机后一般不能保存。所以在使用全站仪开始测量之前，经常要在模式设置状态下，设置一些特定的作业模式。设置时按[F2]键打开电源，仪器进入设置作业模式状态，可以进行单位设置（UNIT SET）、模式设置（MODE SET）和其他设置（OTHERS SET），也能够进行语言设置。具体设置项目和功能见表 5.4。

表 5.4　工作模式设置的主要项目与功能

菜　单	项　目	选 择 项	功　　能
1. UNIT SET	TEMP. &PRES	C/F hPa/mmHg/in-Hg	选择大气压改正用的温度单位和气压单位
	ANGLE	DEG（360°） GON（400G） MIL（6400M）	选择测角单位： DEG/GNG/MIL（度/冈/密位）
	DISTANCE	METER/FEET/ FEET and INCH	选择距离单位： m/ft/ft & in（米/英尺/英尺和英寸）

续表

菜　单	项　目	选择项	功　能
2. MODE SET	POWER ON MODE	ANGLE MEAS. / DISTANCE MEAS.	选择开机后进入角度或距离测量模式
	FINE/CRS/TRK	FINE/COARSE/TRACK	选择开机后距离测量模式中选择设置精测/粗测/跟踪模式
	HD & VD/SD	HD & VD/SD	选择开机后设置显示水平距离和垂直距离/倾斜距离的先后顺序
	V ANGLE Z0/H0	Zenith 0/ Horizontal 0	选择竖直角读数,天顶为 0 或水平方向为 0
	N-TIMES/REPEAT	N-TIMES/REPEAT	选择开机后距离测量模式中,N 次测量/重复测量
	TIMES OF MEAS.	0 ~ 99	设置距离测量次数 N,当 N 为 1 时就是单次测量
	NEZ/ENZ	NEZ/ENZ	选择坐标显示的顺序为 NEZ/ENZ
	HA-0-INDEX	ON-MEMORY/ ON/OFF	设置水平角与竖直角一样具有零位置,仪器关机后仍可恢复预置的角度(ON-MEMORY)
	ESC KEY MODE	DATA COLLECT/ LAYOUT/OFF	在正常测量模式下按[ESC]键,直接进入数据采集或放样测量模式
3. ORTHERS SET	H-ANGLE BUZZER	ON/OFF	选择水平角为 90°、180°、270°附近时是否发出蜂鸣声
	S/A BUZZER	ON/OFF	选择在设置声响模式下,是否发出蜂鸣声
	W-CORREC-TION	OFF/K = 0. 14/ K = 0. 20	设置大气折光和地球曲率改正,K = 0. 14/ K = 0. 20,或不进行改正
	NEZ MEMORY	ON/OFF	选择关机后测站点坐标是否保存
	REC TYPE	REC-A/REC-B	选择数据输出的模式 REC-A 或 REC-BREC-A:输出重新测量的新数据 REC-B:输出正在显示的数据
	CRLF	ON/OFF	选择数据输出后是否含有回车与换行
	NEZ REC FORM	8 DIGITS/9 DIGITS/with RAW	选择坐标记录格式:8 位、9 位或附原始观测数据
	LAYOUT NEZ REC	ON/OFF	选择在放样模式下是否记录由键盘直接输入的坐标
	ACK MODE	STANDARD/ CMITTED	设置与外设通讯的回答方式 STANDARD:标准方式 CMITTED:即使外设略去[ACK]协议信息,也不再发送数据

5.2.8 数据采集

GTS-211D 可将测量数据存放在其内存中的 MEAS. DAT 区域，最多存放 2400 个点。测量完成时必须返回到主菜单后再关机，否则数据可能会丢失。

数据采集模式的测站点与方位角是和正常测量模式相联系的，在数据采集模式下还可以设置或改变测站点与方位角。测站点和后视点的设置既可以调用存贮在内存中的坐标数据来设置，也能够从键盘直接输入坐标数据。方位角也可以直接输入。

数据采集的详细操作参照产品使用手册的说明，在此不作详细介绍。除非仅仅是测量一个区域内的高程点数据，否则建议不要使用此功能进行工作。

5.2.9 拓普康 GPT-2005 电子全站仪

拓普康 GPT-2005 电子全站仪与 GTS-211D 电子全站仪的测量精度和外形完全相同，只是内部增加了无棱镜测量（激光测量）功能，并且在距离测量模式和坐标测量模式下软键的第一页［F3］键进行设置（图 5.16）。其他少数功能键作了一点调整，在此不作详细说明。

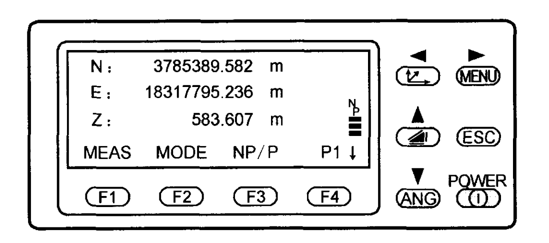


图 5.16 GTS-2005 全站仪坐标测量模式

5.3 索佳 SET 505/510/530R 电子全站仪

5.3.1 各部件名称与功能

索佳（SOKKIA）SET 505 电子全站仪的测角精度为 ±5″，测距精度 ±（3 + 2ppm × D）毫米，单棱镜测程 2.0 公里，三棱镜测程 2.4 公里，外形和各部件的名称如图 5.17 所示，两面都具有操作按键和显示窗，操作简单方便，可以进行角度、距离、坐标、偏心、悬高和对边测量，还能够进行数据采集、传输与存储，可以使用反射片进行测量。

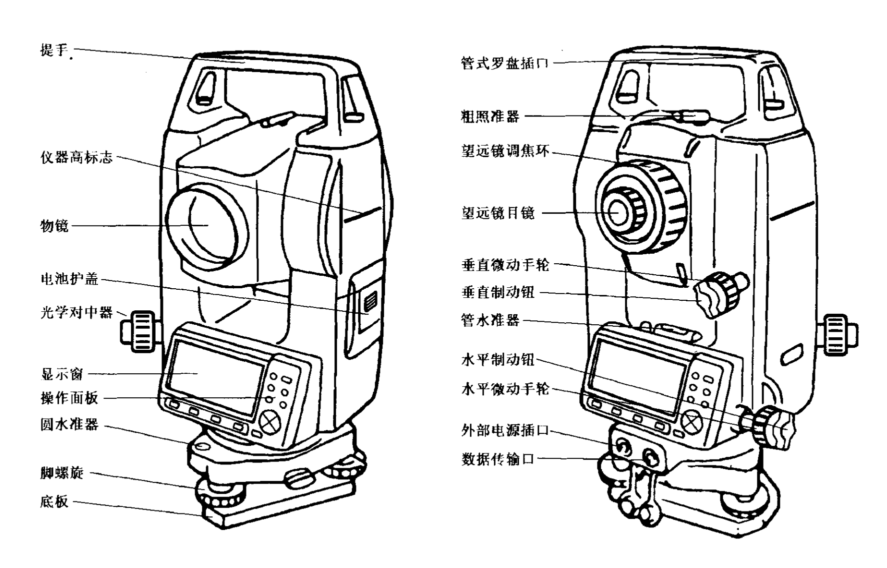


图 5.17　索佳 SET 505/510 电子全站仪

仪器的操作面板上有 11 个操作键(图 5.18),通过这些操作键可以实现野外测量工作中需要的各种功能,其中包括电源开关、测量模式选择、翻页、字母与数字的输入、回车确认等等。索佳 SET 505 电子全站仪的两个操作面板完全相同,使用时同步显示相同的内容。

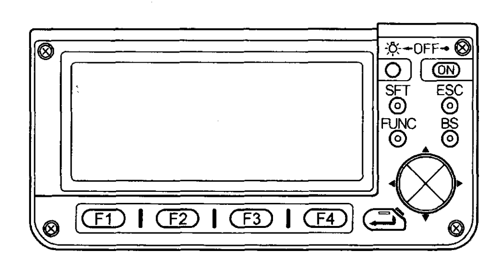


图 5.18　SET 505 全站仪的操作面板

显示窗使用 192 × 80 点阵的液晶显示器,自带背光设置,可以夜间作业,表面为无反光玻璃。各操作键的名称和功能见表 5.5 所示。显示窗的对比度和照明都可以调节。显示窗中常见符号的含义如表 5.6 所示。

表 5.5　索佳 SET 505 全站仪操作键的名称和功能

键	名　称	功　　能
F1 ~ F4	软　键	功能参见所显示的信息
ESC	退出键	返回到前一模式或前一显示状态,或者取消输入的内容
FUNC	功能键	改变测量模式的菜单选项,或者翻页显示字母或数字
↵	回车键	对输入的数据或字母予以确认

续表

键	名　称	功　　能
ON	开关键	开机键
☼	照明键	显示窗照明的打开与关闭，按住[ON]后再按此键关机
BS	清除键	删除光标左边的一个字符
SFT	上档键	转换字母的大小写
▲ ▼	箭头键	分别为上下移动光标
◀ ▶	箭头键	分别为左右移动光标

表 5.6　索佳 SET 505 全站仪常见显示符号的含义

显　示	内　　容	显　示	内　　容
ZA	天顶距	N	北向坐标
HAR	右水平角	E	东向坐标
HAL	左水平角	Z	高程
H	水平距离	m	米单位
V	高差	ft	英尺单位
S	斜距	fi	英尺和英寸单位

在坐标测量模式下，显示的 N0、E0、Z0 表示架设仪器的测站点坐标，Inst. h 表示仪器高，Tgt. h 表示目标或棱镜高，NBS、EBS、ZBS 表示确定起始水平角时架设棱镜的后视点坐标。

5.3.2　测量准备

1. 索佳 SET 505 上配置有圆水准器和管水准器，分别用于初步整平和精确整平，并且有光学对中器用于光学对中。

2. 按压[ON]键，即可开机，首先进行初始化约 2 秒，然后显示零指标设置指令(0SET)，提示需要进行天顶距 ZA 和右水平角 HAR 的零设置(图 5.19)。

3. 全站仪的水平和垂直度盘上都装有电子基准，水平和垂直方向转动望远镜，传感器通过该基准时，仪器自动设置水平和垂直角分别为 0°00′00″和 90°00′00″，并发出轻微的声音，开始角度测量工作。同时

显示棱镜常数(PC)、大气改正值(ppm)、电池电量等等,棱镜常数一般设置为 -30,反射片为0(图5.20)。

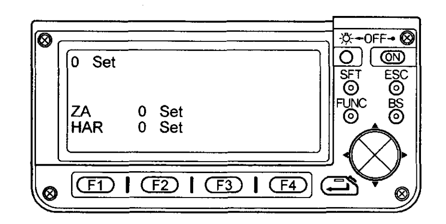
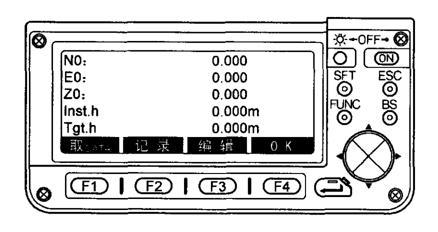


图5.19 SET 505 的开机状态

图5.20 SET 505 的距离测量模式

4. 开机后,电池现存容量在显示窗的右侧通过电池符号显示,电池符号自上而下慢慢变成空心,表示电量不断减少,空心时需要更换电池并充电。更换电池时应该扶稳仪器,轻轻打开电池盒盖板,更换后轻轻合上盖板,开机后先前设定的水平角数值不会变化。

5. 在测量工作中,当输入仪器高、棱镜高、测站点坐标、后视点坐标等参数时,需要输入字母和数字。输入字符时:(1) 用[▲]或[▼]将箭头移动到需要输入的条目(图5.21);(2) 按[F3](编辑)键进入编辑状态,同时底行显示字符;(3) 按[FUNC]键选择另一字符页,短时间按压往后翻页,稍长时间按压则往前翻页;(4) 再按软功能键选择某一个字符,按压[BS]键则删除光标前的字符;(5) 按回车键结束当前条目编辑,下一个条目进入编辑状态(图5.22)。



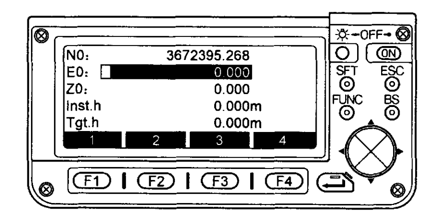


图5.21 仪器高等参数设置菜单

图5.22 输入数字的方式

5.3.3 角度测量模式

水平角右角和垂直角的测量极为简单,首先确认处于角度测量模式,并进行目镜调焦、物镜调焦后,再照准目标(十字丝与反射棱镜中心重合),显示窗即可显示出读数。如果需要设置某一目标(如磁北方

向)的水平角为 0°00′00″,按压[F3](置零)键两次即可。第一次按压[F3](置零)键后,[F3]上方的“置零”二字闪烁,需要第二次按压[F3](置零)键进行确认(图 5.20)。

仪器没有整平或者旋转过快时,显示窗不显示角度数据,此时仪器会提示“Out of range”,如果仪器静止时仍有这样的提示,则需要整平仪器。

5.3.4 距离测量模式

距离测量时理论上应该设置大气改正值,该值可以通过测量温度和气压求得。同时还需要设置棱镜常数,棱镜架上一般都标注有棱镜常数,很多棱镜的常数为 -30,反射片的常数为 0,棱镜架上没有标注时应该首先检测棱镜常数。棱镜常数设置后,关闭电源也仍然保存。索佳 SET 505 仪器在测量模式第 2 页的测距参数设置(EDM)中可以更改测量参数,设置时使用上下箭头选择设置的项目,左右箭头选择每项设置的内容(如棱镜或反射片选项),选择完毕后其棱镜常数随之改变。

距离测量是仪器开机后,望远镜照准棱镜中心,按压距离测量模式[F1](距离)键即可开始工作。仪器闪动显示测距模式、棱镜常数和大气改正数等信息,测距完成后显示窗中部显示倾斜距离 S、竖直角 ZA 和水平右角 HAR(图 5.23)。如果仪器处于重复测量模式下,会不断重复测量,直到按压[F4](停止)键后停止。考古测量中一般设为单次测量即可满足精度要求,以节约电量。此时如果再按压[F2](切换)键,显示内容改变为倾斜距离 S、水平距离 H 和垂直距离 V(图 5.24)。

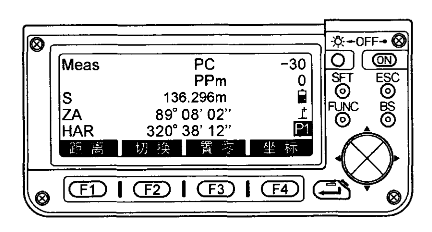



图 5.23 SET 505 的距离测量模式

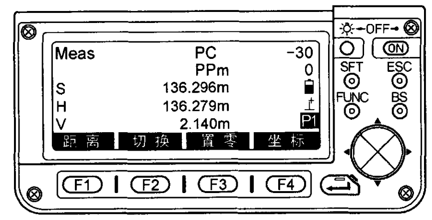


图 5.24 SET 505 的距离分量测量模式

5.3.5 坐标测量模式

索佳 SET 505 全站仪开机后按压[F4](坐标),仪器进入坐标测量模式,显示窗显示测站设置(Stn. Orientation)、观测(Observation)和测距参数设置(EDM)三个菜单(图 5.25)。测站设置菜单中有测站点坐标(Stn Coordinate)和设置水平角(Set H angle)两项(图 5.26),测站点坐标可以输入当前测站点的坐标(N0、E0、Z0)、仪器高(Inst. h)和目标高(棱镜高)(Tgt. h)(图 5.21)。仪器关闭之后,测站点坐标、仪器高和棱镜高等数值仍能保存。上述数值没有输入时,全部以 0 计算。

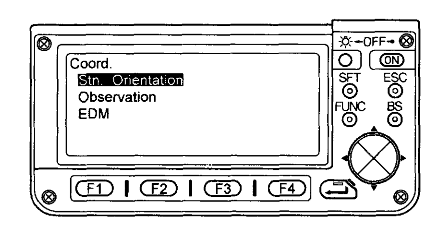


图 5.25 SET 505 的坐标测量模式

图 5.26 设置测站点坐标和水平角

水平角设置方式有输入水平角(H angle)和后视点(Back sight)坐标两种情况,可以根据具体情况选择其中一种方法设置水平角。通过键盘输入水平角时,首先照准参考目标,通过键盘输入所要求的水平角(图 5.27),具体方法与 Topcon 全站仪相同。通过后视点输入时,首先应该确保测站点坐标已经输入仪器中,然后照准另外一已知坐标点上架设的棱镜,按压[F3](编辑)键进入输入状态,直接输入架设棱镜点

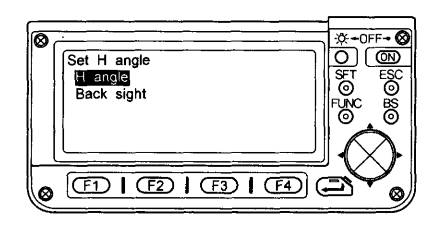


图 5.27 水平角设置菜单

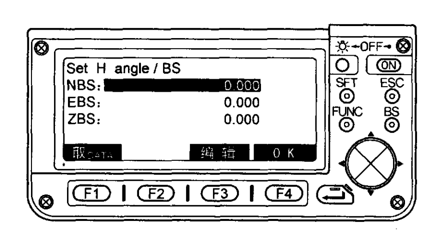


图 5.28 后视点设置菜单

(后视点)的坐标(NBS、EBS、ZBS),按压[F4](OK)键确认后,仪器会自动计算并设置由测站点至后视点连线方向的方位角(水平角)(图 5.28)。

5.3.6 索佳 SET 510/530R 电子全站仪

索佳 SET 510/530R 电子全站仪外形和精度与 SET 505 一致,但是内部菜单全部改成中文模式,操作更为便利,仪器开机自检后直接进入工作状态,不必作水平或垂直方向的转动。其中 SET 530R 电子全站仪具有激光测距功能,在测量模式第 2 页的测距参数设置(EDM)中,将反射镜选择"无"之后,反射镜常数变为 0,就会发射激光进行测量。此时工作中要特别注意,以免激光射伤他人的眼睛。而且注意在无棱镜测量状态下,不能使用棱镜或反射片进行测量。

5.4 EPSW2003 外业测绘系统

EPSW2003 外业测绘系统由北京清华山维新技术开发公司设计,是内外业一体化数字测绘系统,可以配合多种电子全站仪进行野外测绘,测绘成果可以根据要求打印输出或直接输入到 CAD 和 GIS 等软件中,作为 GIS 系统的基本数据。在此简要介绍该软件与拓普康 GTS-211D 和索佳 SET 505/510 全站仪联机作业的一些情况,具体功能及操作方法请参照该软件使用说明书。

1. 工程名设定("文件"→"新建工程")。每一个测区(遗址)开始测量时都需要设定一个工程名,并存放在硬盘上专门建立的文件夹中,工作中所有的相关文件都会自动存放到该文件夹中,以后继续测量时只需打开该工程即可。新建工程时需要选择测量模板,对考古测量而言,可以选择 GB_500。

2. 全站仪设置("测图"→"全站仪设置")。全站仪设置对话框打开后,"通讯端口"一般选择 COM1;所列全站仪型号中没有 Topcon GTS-211D,需要单击"自定义的通讯设备"前的复选框,根据全站仪提供的配置,修改第一行为"REM 拓普康 GTS 211D",再将第二行的"波特率,校验,数据位,停止位"分别改为"9600,N,8,1",保存修改的内容;或者选择 Topcon GTS300 系列。

使用索佳 SET 505/510 全站仪时,选择"索佳 SET B/C 系列"全站仪即可。

3. 根据具体情况,设定"设置"菜单下的"系统环境设置"、"工作区设定"、"图廓属性设置"各项,对相关的参数或选项进行修改。

4. 进入“测图”→“控制点管理”对话框，控制点的坐标和高程要求预先测定，应该不少于两个。控制点的点号自己设定，编码一般选择106（埋石图根点）、107（不埋石图根点）。输入一个点的全部数据后，单击“录入”按钮，然后再输入下一个控制点的数据。控制点可以一次录入，也可以多次录入。

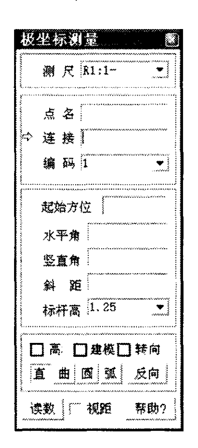


图 5.29 极坐标测量窗口

5. 测站设置（“测图”→“设置测站”）。设置测站对话框中的“测站点”和“后视点”的点号必须是已经录入的控制点，可以用键盘输入，也可以用鼠标左键在屏幕上捕获；仪器高由键盘输入。其中测站点为架设仪器的位置，后视点为设置水平角起始方向的控制点。

6. 测站检核（“测图”→“测站检核”）。测站检核就是在测站点上架设好仪器后，再次测量已经测量的点或已知点，并进行计算和比较，确定测站设置的精度是否满足要求。检核点的点号输入后，全站仪照准检核点上的棱镜，并设置测量模式为水平角、竖直角、斜距模式进行测量。按压计算机的“F1”键，测量数据会自动填入相应的编辑框中。再点击“计算”按钮，计算出 E 纵偏、N 横偏、高程差和平距差，若符合要求，则关闭对话框；如果有超限值，软件会有提示，必须检查更正。

7. 极坐标测量（“测图”→“极坐标测量”）。测站设定和检核后即可进行极坐标测量，其对话框如图 5.29 所示，对话框中各参数的含义及操作如下：

（1）测尺表示使用多个棱镜进行测量时，需要进行选择；

（2）点名是一个工程中碎部点的编号，每测一点，点号自动加 1。除非有特殊情况，不必手动输入。点号不能重复，否则系统将不予接受。自行定义的点号可以是符号、数字、字母或汉字，最多为 7 个字符或三个汉字。

（3）连接是指与当前点连接的点的点名，必须是已测量的碎部点或控制点，系统自动连接前一点，或通过键盘输入、鼠标捕捉、功能键等方法设定。不与任何点连接时编辑框内空白。

（4）编码是 EPSW 软件自行定义的地物类别代码，详细情况见编码表。输入方法有系统默认、键盘输入，或者直接在工具栏中选择。

(5)“起始方向”按钮一般不要输入。仪器照准后视点的时候，仪器水平角设置为0°00′00″时，需要输入后视点的方位角，后视点在正北时不用输入。

(6) 水平角、竖直角、斜距由全站仪直接传输。全站仪照准目标后，按压计算机的“F1”键，就可以得到上述数据；也可以点击左下角的“读数”按钮进行读数。

(7) 标杆高可以通过键盘输入，标杆高变化时需要随时更改。

(8) 测点需要高程注记和参加建模时，点击“高”与“建模”前的复选框。

(9)“直”、“曲”、“圆”、“弧”按钮用于确定当前点与连接点相连接的线型分别为直线、曲线、整圆、圆弧，每次只能按下一个按钮。其中直线由两点确定，曲线和圆弧由三点确定，整圆是以连接点为圆心、当前点与连接点的距离为半径画圆。

(10)“反向”按钮用于确定有方向地物(如陡坎)的方向。在此按钮上单击一下变为“反向”，再单击一下又变为“正”。

一个点的内容确定完毕时，需要敲击回车键确认，进入下一点的测量工作。

8. 全部测量工作结束，高程点数目合适后即可建模，并生成等高线。但有时所测高程点的分布不很合理，需要根据地表情况人为补充一些，以便忠实地反映地表状况。在“地模”→“生成三角网”菜单中，需要输入“三角网名”和最大边长数值，选择“全部数据”复选框，再点击“生成三角网”按钮。

9. 打开“地模”→“自动生成等高线”对话框，修改等高线注记中小数位数字与计曲线上高程注记间隔，点击“生成等高线”按钮，就可以生成等高线。

10. 根据需要对图形进行修改操作，通过“文件”→“输出 AutoCAD 数据 DXF”输出成 DXF 格式的文件或按比例打印图形。

5.5 测量误差分析及注意事项

使用全站仪进行测量时，存在着很多误差。对各种误差的成因、性质及影响规律进行分析，采用一定的观测方法，将有助于减少这些误差的影响，提高测量的精度。测量的误差来源包括仪器误差、观测误差和

外界条件的影响等三个方面。

5.5.1 仪器误差

仪器误差包括仪器检验和校正之后的残余误差、仪器零部件加工不完善所引起的误差等。这些误差有的很小，对测量精度影响不大，有的可以通过适当的观测方法来消除或降低影响。主要有以下几种情况：

1. 视准轴误差

又称视准差，由望远镜视准轴不垂直于横轴引起，且盘左、盘右观测时符号相反，故在水平角测量时，可采用盘左盘右一测回观测取平均数的方法加以消除。

2. 横轴误差

又称支架差，由横轴不垂直于竖轴引起，盘左、盘右观测中的支架差符号相反，故水平角测量时，同样可采用盘左、盘右观测，取一测回平均值的方法加以消除。

3. 竖轴误差

由仪器竖轴不垂直于水准管轴、水准管整平不完善、气泡不居中所引起。由于竖轴不处于铅垂线位置，引起横轴不水平，角度测量时就会产生误差，且误差的大小随望远镜瞄准不同方向、横轴处于不同位置而变化。降低影响的方法是观测前严格检校仪器，观测时应仔细整平，保持照准部水准管气泡居中，气泡偏离量不得超过一格。

4. 度盘偏心差

属于仪器零部件加工安装不完善引起的误差。在水平角测量和竖直角测量中，分别有水平度盘偏心差和竖直度盘偏心差两种。

水平度盘偏心差是由照准部旋转中心与水平度盘圆心不重合所引起的指标读数误差。因为盘左、盘右观测同一目标时，指标线在水平度盘上的位置具有对称性（即对称分划读数），所以测量水平角时，取盘左、盘右读数的平均数来减少影响。

竖直度盘偏心差是指竖直度盘圆心与仪器横轴（即望远镜旋转轴）的中心线不重合产生的误差。在竖直角测量时，该项误差的影响一般较小，可忽略不计。在高精度测量工作时，可以检测竖盘偏心误差系数，对相应竖角测量成果进行改正；或者采用往返观测竖直角的方法来消除竖盘偏心差对测量成果的影响。

5. 不均匀误差

由于仪器零部件加工不完善引起的误差。现代制造的精密仪器，度盘刻划误差一般都很小。为提高水平角测量精度，在多测回的观测中，可利用变换水平度盘位置的方法减小其影响。

5.5.2 观测误差

1. 对中误差

如果仪器中心与测站点不在同一铅垂线上，所产生的误差就是对中误差，又称测站偏心误差。对中误差的影响与偏心距离成正比，与测站点至目标的距离成反比。对中误差无法通过观测方法予以消除，在测量工作中，应该严格对中。

2. 目标偏心误差

观测点上的棱镜杆倾斜时，将使照准点偏离地面目标而产生目标偏心误差。目标偏心误差对水平角观测的影响与棱镜高度成正比，与测站点至目标的距离成反比。为此观测时应尽量使观测点上的棱镜杆竖直，并尽可能地降低陵镜高度。

3. 照准误差

测量工作中人的眼睛通过望远镜瞄准目标产生的误差，称为照准误差。其影响因素很多，如望远镜的放大倍率、人眼的分辨率、十字丝的粗细、标志的形状和大小、目标影像的亮度和清晰度等。在测量工作中，应该选择好的仪器设备与工作环境，仔细进行目镜和物镜的调焦。

5.5.3 外界条件的影响

观测角度在一定的外界条件下进行，外界条件及其变化对观测精度有直接影响。如测站点地面松软和大风会影响仪器的稳定，阳光直射和温度变化影响水准管气泡的居中，地面热辐射会引起目标影像的跳动等等，都会使角度和距离观测产生误差。因此，要选择合适的观测时间，避开不利条件的影响，以提高观测成果的精度。例如，测站应选择在坚硬的地面上，避开中午前后的时间进行测量，观测视线尽量远离建筑物等，并离地面和水面有一定的高度。

5.6 电子全站仪在田野考古中的应用

电子全站仪在田野考古中具有非常重要的作用,从发掘前的探方布设到各种遗迹陆续出现后的精细测绘,电子全站仪都是最佳的测绘仪器。

以前很多田野考古工地使用罗盘与卷尺进行布方与细部测绘,误差很大,特别是地表有一些起伏或者是斜坡的情况下,布方与测绘的精度会更低。有的大型考古遗址也进行了一定的分区,但是从基点到发掘区经常有几百米甚至近公里的距离,布方时通过卷尺丈量的误差不断累积,最终会产生数米甚至二、三十米的误差,布方的结果与整个遗址的总图无法统一起来。同时,即便是局部区域布方特别规整,但整个遗址内的控制测量方法不合理,每次探方的定位精度仍然很低,几年之后在实地很难确定以前曾经发掘过的探方的准确位置。所以很有必要使用电子全站仪对整个考古遗址进行控制测量、布方与细部测绘。

一个考古遗址中不论是布方还是进行细部测量,关键是要建立高精度的测量控制网,即需要在遗址内均匀埋设一定数目的永久测量控制点,然后使用电子全站仪进行高精度的坐标测量,详细记录每个控制点的三维坐标值,绘制控制点的分布图,控制点遭到破坏后要随时增补。采用的坐标系统可以是国家坐标系,也可以是自己设定的任意坐标系。如果采用国家坐标系,必须在遗址内或者遗址附近找到至少两个已知坐标的控制点,控制点的三维坐标值可以在相应省、市的测绘部门抄录,抄录时应该注意已知控制点的坐标是1954年北京坐标系的坐标,还是1980西安坐标系的坐标。然后再由已知控制点到未知控制点进行测量,逐步建立起遗址内的测量控制网。如果采用任意坐标系,因为平常的探方都是以磁北方向为探方的北方,所以一般也是以磁北方向为坐标纵轴方向。坐标原点选择在整个遗址的西南角外侧,目的是使整个遗址中的坐标值都是正数。

进行控制测量时,如果采用国家坐标系统,应该在一个已知控制点上架设电子全站仪,另外一个已知控制点上架设棱镜,其中架设电子全站仪的控制点称为测站点,架设棱镜的控制点称为后视点。待仪器整平、对中、再整平之后,打开电子全站仪,在坐标测量模式下输入测站点的坐标、仪器高与棱镜高;同时还需要设置从测站点至后视点方向的方

位角，这个数值需要根据两个控制点的坐标值来计算。很多型号的电子全站仪可以通过直接输入后视点的坐标，由仪器自动计算方位角，但是 Topcon GTS-211D 没有此项功能。一切准备就绪后，就可以在未知点上架设棱镜，坐标模式下测量的三维坐标值就是未知点的三维坐标。迁移测站前，应该测量下一个测站点的坐标和方位角。如图 5.30 中，如果需要将测站从 N_A 点迁移至 N_B 点，首先应该在 N_A 点测量 N_B 点的三维坐标与 N_AN_B 连线的方位角 α_{AB}。在 N_B 点架设仪器后，将 N_A 点作为后视点，N_BN_A 连线的方位角：

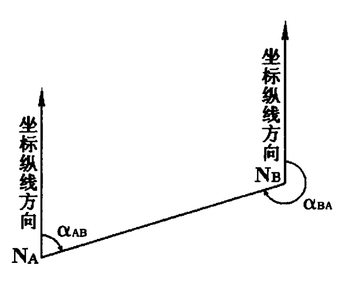


图 5.30

$$\alpha_{BA} = \alpha_{AB} \pm 180°$$

所以，在 N_B 点将全站仪对中、整平后，照准架设在 N_A 点的棱镜，在测站点设置中输入 N_B 点的三维坐标与方位角 α_{BA}，检查无误后即可继续测量。但是在测量下一个点之前最好先测量一、两个已知坐标的控制点（如 N_A 点）或者已经测量的碎部点进行检核。

采用任意坐标系时，首先应该在遗址内选择一个地势较高、视野开阔的位置架设全站仪，整平仪器后，使用光学对中器在地面上确定测站点的位置，并精确插入木桩（上面应该钉上小钉子）或铁钎，使全站仪光学对中器的中心与木桩上的小钉子或铁钎中心重合。然后由测站点向磁北方向拉一条细线，使用罗盘反复测量细线的方向，确保磁北方向线具有足够的精度。最后转动全站仪照准细线，使十字丝的竖丝与磁北方向线重合，设置全站仪的水平角为 0°00′00″ 即可。如果条件不允许，也可以照准向南或其他方向，相应的水平角应该设置成 180°00′00″ 或其他数值。如果测站附近有高压线通过，或者其他原因对罗盘的方向造成影响时，需要在夜晚测定北极星的方向（真北方向），再根据当地1∶5 万地形图上磁北与真北方向的夹角（磁偏角）的数值，将全站仪转动一个磁偏角的角度，磁偏角为正数时向东转动，负数时向西转动，确定磁北方向，并在磁北方向上插一铁钎，使其与全站仪十字丝的竖丝重合。

确定测站点坐标时，可以先测量测站点到遗址最南端和最西端的距离，或者是在其他现有的地形图上大致量取这两段距离，并以此数值作为参考，以稍大一些的数值作为测站点的平面坐标，确保整个遗址中

所有点的坐标都是正数。一般情况下,为了便于记录和使用,第一个测站点的平面坐标值取至整百米,比如(1200,500),其他测站点的坐标值则根据实际测量而得。高程值可以随意确定,也可以根据全球定位系统测量或在现有地形图确定大致的高程值。进一步的控制测量则如同前文描述的采用国家坐标系统的情况一样。

布设探方的时候可以使用全站仪的坐标放样功能,在测站点坐标与方位角输入后,进入放样测量模式,输入一个探方角点的坐标,然后在地面上大致相应的位置竖立棱镜,测量后仪器显示现在的棱镜位置与待定点位置北坐标与东坐标的差值,据此移动棱镜,直至上述的差值可以忽略(如都在5毫米以内)为止,然后进入下一个探方角点的测量定位工作。也可以在全站仪的坐标测量模式下直接测量棱镜位置的坐标,由仪器操作员计算棱镜位置与待定点位置北坐标与东坐标的差值,再渐次移动棱镜到合适的位置。在坐标模式下工作时可以不必每次输入探方角点的坐标,速度会更快一些。

碎部测量时可以在坐标测量模式下,测量各细部点的坐标,然后在坐标纸上逐点标绘,并描绘成图。

第六章　卫星定位系统简介

卫星定位系统(SPS,Satellite Positioning System)是利用在空间飞行的卫星不断向地面广播发送加载某些特殊定位信息的无线电信号来实现定位测量的定位系统。卫星定位系统一般包含三个部分:第一部分是空间运行的卫星星座,多个卫星组成的星座系统向地面发送某种时间信号、测距信号和卫星瞬时的坐标位置信号。第二部分是地面控制部分,通过接收上述信号来精确测定卫星的轨道坐标、时钟差异,检查其运转是否正常,并向卫星注入新的卫星轨道坐标,进行必要的卫星轨道纠正等。第三部分是用户部分,通过用户的卫星信号接收机接收卫星广播发送的多种信号并进行处理计算,确定用户的最终位置。用户接收机通常固连在地面某一确定目标或运载工具上,以实现定位和导航的目的。

现在正在运行的卫星定位系统有美国的全球定位系统(GPS,Global Positioning System)和俄罗斯的全球卫星导航系统(GLONASS)。后者因星座中卫星缺失太多,暂时不能连续实时定位。正在发展研究的有欧盟的GALILEO系统和中国的北斗卫星导航系统(Compass Navigation Satellite System,中文音译名称为Beidou)。具有全球导航定位能力的卫星定位导航系统称为全球卫星导航系统(GNSS,Global Navigation Satellite System)。

GPS导航定位系统不但可以用于军事上各种兵种和武器的导航定位,而且在民用上也可以发挥重大作用。如智能交通系统中的车辆导航、车辆管理和救援,民用飞机和船只导航及姿态测量,大气参数测试,电力和通信系统中的时间控制,地震和地球板块运动监测,地球动力学研究等。特别是在大地测量、城市和矿山控制测量、建筑物变形测量、水下地形测量等方面得到广泛的应用。

卫星导航定位系统克服了地基无线电导航系统的局限,能为世界上任何地方(包括空中、陆上、海上甚至外层空间)的用户全天候、连续

地提供精确的三维位置、三维速度以及时间信息。全球卫星定位导航系统的出现,是导航定位技术的巨大革命,它完全实现了从局部测量定位到全球测量定位,从静态定位到实时高精度动态定位,从限于地表的二维定位到从地表到近地空间的全三维定位,从受天气影响的间歇性定位到全天候连续定位的飞跃。

从1986年开始,GPS被引入我国测绘界,引起了测绘技术的一场革命,从而使测绘领域步入一个崭新的时代。GPS测量具有很多优点:(1)高精度三维定位,满足各种考古测量的要求;(2)设计和布点方便灵活,控制点之间不必通视;(3)对地理条件和作业条件要求低,高山、沙漠地区能进行全天候作业;(4)工作效率高,自动进行观测、记录和计算,目前已被广泛应用于测绘行业。不足之处是不能在楼群之间和地下(如墓室)中进行测量。

6.1 全球定位系统的组成

全球定位系统(GPS)是“授时、测距导航系统/全球定位系统(Navigation System Timing and Ranging/Global Positioning System)”的简称。该系统是由美国国防部于1973年组织研制,历经20年,于1994进入完全运行状态,主要为军事导航与定位服务的系统。GPS是以卫星为基础,以无线电为通讯手段,依据天文大地测量学的原理,实行全球连续导航和定位的高新技术系统。具有全球性、全天候、高精度、快速实时的三维导航、定位、测速和授时功能,以及良好的保密性和抗干扰性。

全球定位系统已先后发展了三代卫星,整个系统主要由空间卫星部分、地面监控部分和用户设备部分组成。

6.1.1 空间部分

GPS卫星星座设计为21颗工作卫星,3颗备用卫星,实际已有27~28颗在轨运行卫星。工作卫星分布在6个近圆形轨道上,每个轨道上有4颗卫星。卫星轨道面相对地球赤道面的倾角为55°,各轨道面升交点赤经相差60°,轨道平均高度为20200公里,卫星运行周期为11小时58分(如图6.1)。在地球上任何地区、任何时刻,可以同时接收4至11颗卫星的信号。每颗卫星装有4台高精度原子钟(2台铷钟,2台铯钟),频率稳定度为10^{-12}~10^{-13},为GPS测量提供高精度的时间标准。

GPS 卫星的主要功能是接收并存储由地面监控站发来的导航信息；接收并执行主控站发出的控制命令，如调整卫星姿态，启用备用卫星等；向用户连续发送卫星导航定位所需信息，如卫星轨道参数、卫星健康状态及卫星信号发射时间标准等。

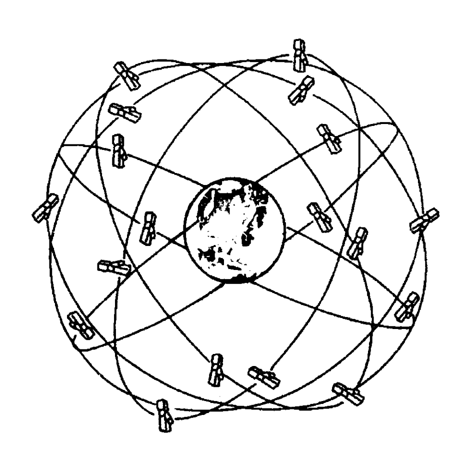


图 6.1　GPS 空间卫星星座

GPS 卫星向地面发射的信号是经过二次调制的组合信息。它是由铷钟和铯钟提供的基准信号（F = 10.23MHz），经过分频或倍频产生 $D(t)$ 码（50Hz）、C/A 码（1.023MHz，波长 293m）、P 码（10.23 MHz，波长 29.3m）、L_1 载波（F_1 = 1575.42MHz）和 L_2 载波（F_2 = 1227.60MHz）。$D(t)$ 码是卫星导航电文，其中含有卫星广播星历和空中 24 颗卫星历书（卫星概略坐标）。星历是采用世界大地坐标系（WGS-84）计算出来的，分为广播星历和精密星历两种，精密星历由美国国防测绘局编制。地面跟踪站预报星历，根据这些数据可以计算出卫星在地面固定坐标系中的瞬时坐标值。

6.1.2　控制部分

地面监控部分是由分布在世界各地的五个地面站组成。按功能可分为监测站、主控站和注入站三种。

1. 监测站

监测站设在科罗拉多、阿松森群岛、迭哥伽西亚、卡瓦加兰和夏威夷。站内设有双频 GPS 接收机、高精度原子钟、气象参数测试仪和计算机等设备。主要任务是完成对 GPS 卫星信号的连续观测，并将搜集的数据和当地气象观测资料经处理后传送到主控站。

2. 主控站

主控站设在美国本土科罗拉多空间中心。它除了协调管理地面监控系统外，还负责将监测站的观测资料联合处理，推算卫星的星历、卫星钟差和大气修正参数，并将这些数据编制成导航电文送到注入站。另外它还可以调整偏离轨道的卫星，使之沿预定轨道运行；调度备用卫

星，替代失效的卫星开展工作。

3. 注入站

注入站设在阿松森群岛、迭哥伽西亚、卡瓦加兰。其主要任务是将主控站编制的导航电文、计算出的卫星星历和卫星钟差的改正数等，通过直径为3.6米的天线注入给相应的卫星。

6.1.3 用户部分

用户设备主要由GPS接收机、硬件和数据处理软件、微处理机及终端设备组成；GPS接收机由主机、天线和电源组成。其主要任务是捕获、跟踪并锁定卫星信号；对接收的卫星信号进行处理，测量出GPS信号从卫星到接收机天线间传播的时间；译出GPS卫星发射的导航电文，实时计算接收机天线的三维位置、速度和时间。

从原理上分类，GPS接收机可分为码相关接收机、码相位接收机和平方接收机三类。各类接收机又可分为单频和双频两种。目前发达国家生产的GPS接收机，其性能各异，型号众多。按其用途可以分为精密测量的测地型，航空、航海的导航型和精确授时的授时型三种。

6.2 GLONASS、GALILEO与北斗卫星导航系统

6.2.1 GLONASS全球定位系统

GLONASS是前苏联从20世纪80年代初开始建设的与美国GPS系统相类似的卫星定位系统，也由卫星星座、地面监测控制站和用户设备三部分组成，现在由俄罗斯空间局管理。GLONASS的整体结构类似于GPS系统，其主要不同之处在于星座设计、信号载波频率和卫星识别方法不同。

GLONASS星座由24颗卫星组成，工作卫星分布在3个近圆形轨道上，每个轨道上有8颗卫星。卫星轨道面相对地球赤道面的倾角为64.8°，轨道平均高度为19100公里，卫星运行周期为11小时15分。

载波频率为L1：$1602.0000 + 0.5625 \times i$ MHz，L2：$1246.000 + 0.432 \times i$ MHz。其中i为卫星频道编号（$-7 \leq i \leq 24$），根据载波频率来区分不同卫星。

GLONASS的卫星导航定位信号类似于GPS系统，测距信号也分

为民用码和军用码。广播星历的参数与 GPS 也很类似。

6.2.2 伽利略全球定位系统

GALILEO 系统是欧洲自主的、独立的全球多模式卫星定位导航系统,可提供高精度、高可靠性的定位服务,同时实现完全非军方控制和管理。

GALILEO 系统由 30 颗卫星组成,其中 27 颗工作星,3 颗备用星。卫星分布在 3 个中地球轨道上,轨道高度为 23 616 公里,轨道倾角 56°。每个轨道上部署 9 颗工作星和 1 颗备用星,某颗工作星失效后,备用星将迅速进入工作位置替代其工作,而失效星将被转移到高于正常轨道 300 公里的轨道上。

欧盟的一些专家称,GALILEO 系统系统可与美国的 GPS 和俄罗斯的 GLONASS 兼容,但比后两者更安全、更准确,有助于欧洲太空业的发展。

GALILEO 系统按不同用户层次分为免费服务和有偿服务两种级别。免费服务包括:提供 L1 频率基本公共服务,与现有的 GPS 民用基本公共服务信号相似,预计定位精度为 10 米。有偿服务包括:提供附加的 L2 或 L3 信号,可为民航等用户提供高可靠性、完好性和高精度的信号服务。系统定义了三种类型的业务:(1) 开放接入业务(OAS):向所有民用用户开放的免费业务;(2) 一类控制接入业务(CAS 1):为商业应用提供并实施控制接入的有偿服务;(3) 二类控制接入业务(CAS 2):为安全和军事应用提供并实施控制接入的有偿服务。所有这三类服务的精度都优于 10 米。CAS 2 可实现水平 4 米、垂直 16 米的定位精度。

6.2.3 北斗卫星导航系统

中国于 2000 年 10 月 31 日、2000 年 12 月 21 日和 2003 年 5 月 25 日发射了三颗北斗一号导航卫星(两颗工作卫星、一颗备用卫星),构成北斗一号导航系统的空间部分。两颗工作卫星位于地球赤道平面上,为地球同步卫星,赤道角距约 60°,轨道高度 36000 公里,工作频率为 2491.75MHz。“北斗一号”的覆盖范围是北纬 5° ~ 55°,东经 70° ~ 140°之间的地区,最宽处在北纬 35°左右。其定位精度为水平精度 100 米,设立标校站之后为 20 米(类似差分状态)。

北斗一号导航系统卫星数量少、投资小、用户设备简单价廉,能实现一定区域的导航定位、通讯等多用途,可满足当前我国陆、海、空运输导航定位的需求。缺点是不能覆盖两极地区,赤道附近定位精度差,只能二维主动式定位,且需提供用户高程数据,不能满足高动态和保密的军事用户要求,用户数量受一定限制。

北斗卫星导航广域增强系统计划在2020年之前建成包括5颗地球同步卫星及30颗中高轨道卫星在内的庞大太空网络,提供开放服务和授权服务两种服务方式:开放服务是在服务区免费提供定位、测速和授时服务,定位精度为10米,授时精度为50纳秒,测速精度0.2米每秒;授权服务是向授权用户提供更安全的定位、测速、授时和通信服务以及系统完好性信息。

6.3 GPS定位原理

GPS接收机接收的卫星信号有伪距观测值、载波相位观测值及卫星广播星历。对于待定点位,根据其运动状态可分为静态定位和动态定位。静态定位是指用GPS测定相对于地球不运动的点位。GPS接收机安置在该点上接收信号数分钟甚至更长时间,以确定其三维坐标,又称为绝对定位。动态定位是确定运动物体的三维坐标。若将两台或两台以上GPS接收机分别安置在固定不变的待定点上,通过同步接收卫星信号,确定待测点间的相对位置,称为相对定位。

6.3.1 伪距测量及伪距单点定位

伪距测量就是测定卫星到接收机的距离,即由卫星发射的测距码信号到达GPS接收机的传播时间乘以光速所得的距离。伪距法单点定位,就是利用GPS接收机在某一时刻测定与4颗以上GPS卫星的伪距,及从卫星导航电文中获得的卫星瞬时坐标,采用距离交会法求出天线在WGS-84坐标系中的三维坐标。

由于GPS采用了单程测距原理,同时卫星钟与用户接收机难以保持严格同步,实际观测的测站至卫星之间的距离,含有卫星钟和接收机钟的系统误差,所以求得的距离称为伪距。卫星钟差可以应用导航电文所给出的钟差参数给予改正,但接收机的钟差不能预先确定,只能把它作为一个未知数,与观测站的坐标在数据处理中一并求解。在一个

测站上为了求解四个未知数，至少需要四个同步伪距观测量，也就是说至少要同时观测四颗卫星。伪距定位的优点是数据处理简单，对定位条件的要求低，可以用一台GPS接收机实现实时定位；其缺点是观测精度低，尚不能满足大地测量、工程测量定位精度的要求，但是在考古调查中可以用于确定遗址的位置，测绘概略图形。

6.3.2 载波相位测量与载波相位定位

载波相位测量是测定GPS卫星载波信号到接收机天线之间的相位延迟。GPS卫星载波上调制了测距码和导航电文，接收机接收到卫星信号后，先将载波上的测距码和卫星电文去掉，重新获得载波，称为重建载波。GPS接收机将卫星重建载波与接收机内由振荡器产生的本振信号通过相位计比相，即可得到相位差。

载波相位定位所采用的观测值为GPS载波相位观测值，优点是观测值的精度高，一般为毫米级；其缺点是数据处理过程复杂，观测时间长。载波相位定位的最基本情况是两台接收机分别安置在基线的两端，同步观测相同的GPS卫星，确定基线端点在WGS-84坐标系中的相对位置或基线向量，这样可以消除多种误差的影响，如果GPS观测与地面已知大地控制点联测，即其中一个端点坐标已知，则可推算另一个待定点的高斯平面直角坐标和大地水准面高程。

6.3.3 GPS实时差分定位

GPS差分定位的原理是在已有的精确地心坐标点上安放GPS接收机（称为基准站），利用已知的地心坐标和星历计算GPS观测值的校正值，并通过无线电通信设备（称为数据链）将校正值发送给运动中的GPS接收机（称为流动站）。流动站利用校正值对自己的GPS观测值进行修正，以消除上述误差，从而提高实时定位精度。GPS动态差分方法有多种。

6.3.3.1 位置差分

是将基准站GPS接收机伪距单点定位得到的坐标值与已知坐标作差分，无线电传送的是坐标修正值，流动站用坐标修正值对其坐标进行修正。其位置差分精度可达5~10米。但是位置差分要求流动站接收机单点定位所用的卫星，与基准站求修正值时所用的卫星完全一致。若有一颗卫星不一致就可能产生45米以上的误差。

6.3.3.2 伪距差分(RTD)

伪距差分是利用基准站已知坐标和卫星星历,求卫星到基准站的几何距离,作为距离精确值,将此值与基准站所测的伪距值求差,作为差分修正值并通过数据链传给流动站。流动站接收差分信号后,对所接收的每颗卫星伪距观测值进行修正,然后再进行单点定位。由于伪距差分是对每颗卫星的伪距观测值进行修正,所以不要求基准站和流动站接收的卫星完全一致,只要有 4 颗以上相同卫星即可。其差分精度取决于差分卫星个数、卫星空中分布状况及差分修正值延迟时间。伪距差分精度为 3 ~ 10 米。基准站距流动站距离可达 200 ~ 300 公里。

近年来又发展为利用相位观测值精化伪距值,以提高差分精度,称为相位平滑伪距差分。其差分精度可达到 1 米。

6.3.3.3 载波相位实时差分(RTK)

由于载波相位观测值精度高,若通过数据链将基准站载波相位观测值传到流动站,在流动站进行实时载波相位数据处理,其定位精度可达到 1 ~ 2 厘米。RTK 差分距离不可太远,目前最远可到 30 公里。另外流动站是否能进行 RTK 差分,取决于数据通信可靠性和流动站载波相位观测值是否失锁。

6.3.3.4 广域差分

广域差分是利用大范围内建立的卫星跟踪网跟踪卫星信号。利用跟踪网已知坐标和原子钟,求每颗卫星的星历改正值、卫星钟改正值及电离层改正参数,并通过无线电台向用户流动站发送。流动站接收这些修正信息,并对观测值进行修正。差分修正后的精度可达到 1 ~ 3 米。差分范围可达到 1000 公里。

6.3.4 GPS 测量的误差来源

GPS 测量是通过接收机接收卫星发送的信号来确定地面点坐标,测量结果的误差主要来源于 GPS 卫星、卫星信号传播过程和接收机等的误差。GPS 卫星误差有卫星星历差和卫星钟差;卫星信号传播误差包括电离层折射误差、对流层折射误差和多路径误差;接收机误差有天线相位中心误差、接收机钟差和观测误差。卫星星历差、卫星钟差、接收机钟差以及折射误差等是系统误差,对测量结果误差影响很大,但可以采取一定的措施加以控制。偶然误差主要是多路径误差,为削弱多路径误差应注意测站位置的选择,测站位置应远离大面积平静水面,也

不宜选择在山坡、山谷和盆地中，测站附近不应有高层建筑物、围墙等信号反射物，以削减多路径误差的影响。

6.4 GPS 接收机的构造和分类

6.4.1 GPS 接收机的构造

GPS 接收机主要由 GPS 接收机天线、GPS 接收机主机和电源三部分组成，其主要功能是接收 GPS 卫星信号并经过信号放大、变频、锁相处理，测定 GPS 信号从卫星到接收机天线间的传播时间，解释导航电文，实时计算 GPS 天线所在位置(三维坐标)及运行速度等等。

6.4.1.1 GPS 接收机天线

GPS 接收机天线由天线单元和前置放大器两部分组成。天线的作用是将 GPS 卫星信号的微弱电磁波能量转化为相应电流，并通过前置放大器将接收到的 GPS 信号放大。为减少信号损失，一般将天线和前置放大器封装为一体。

6.4.1.2 接收机主机

接收机主机由变频器、信号通道、微处理器、存储器和显示器组成。

1．变频器和中频放大器

经过天线和前置放大器的信号仍然很微弱，为了使接收机通道得到稳定的高增益，使接收到的 L 频段射频信号变成低频信号，则采用变频器。

2．信号通道

信号通道是接收机的核心部分，GPS 信号通道是软硬件结合的电路。

GPS 信号通道的作用：(1) 搜索卫星，牵引并跟踪卫星；(2) 对广播电文信号进行解扩、解调，成为广播电文；(3) 进行伪距测量、载波相位测量及多普勒频移测量。

卫星信号是扩频的调制信号，要经过解扩、解调才能得到导航电文。为此，在相关通道电路中设有伪码相位跟踪环和载波相位跟踪环。

3．存储器

接收机内设有存储器，以存储一小时一次的卫星星历、卫星历书、接收机采集到的码相位伪距观测值、载波相位观测值及多普勒频移。

目前 GPS 接收机都装有半导体存储器(简称内存)。接收机内存数据可以传到微机上,以便进行数据处理和数据保存。在存储器内还装有多种工作软件,如自测试软件、卫星预置软件、导航电文解码软件、GPS 单点定位软件及导航软件。

4. 微处理器

微处理器是 GPS 接收机工作的核心,GPS 接收机的工作都是在微机指令的统一协同下进行的。其主要工作步骤为:(1) 控制接收机进行工作状况自检,并测定、校正、存储各通道的时延值。(2) 控制接收机对卫星进行搜索、捕捉。当锁定 4 颗卫星时,利用 C/A 码伪距观测值及星历计算测站的三维坐标,并按预置的更新率计算坐标。(3) 根据机内存储的卫星历书和测站近似位置,计算所有在轨卫星的升降时间、方位和高度角。(4) 存储测站名、测站号、作业员姓名、天线高、气象参数等。

5. 显示屏

GPS 接收机都有液晶显示屏,以提供 GPS 接收机的工作信息。并配有一个控制键盘,用户可通过键盘控制接收机的工作。

6.4.1.3 电源

GPS 接收机的电源有两种,一种为内电源,一般采用锂电池,主要对 RAM 存储器供电;另一种为外接电源,常用可充电的 12V 直流镍镉电池组。

6.4.2 GPS 接收机分类

GPS 卫星是以广播方式发送定位信息。GPS 接收机是一种被动式无线电定位设备。在全球任何地方只要能接收到 4 颗以上 GPS 卫星的信号,就可以实现三维定位、测速、测时,所以 GPS 得到广泛应用。根据使用目的不同,世界上已有近百种不同类型的 GPS 接收机。这些产品可以按不同用途、不同原理和功能进行分类。

6.4.2.1 按用途分类

1. 导航型接收机

此类接收机主要用于运动载体的导航。它可以实时给出载体位置和速度。一般采用伪距单点定位。利用 C/A 码伪距定位的接收机,称为 C/A 码接收机;采用 P 码伪距定位的,称为 P 码接收机(属于限制使用的军用接收机)。导航型接收机定位精度低,但这类接收机价格低

廉，使用广泛。

根据不同应用领域又可分为手持型、车载型、航海型、航空型、星载型。

2. 测地型接收机

测地型接收机主要用于精密大地测量、工程测量、地壳形变测量等领域。这类仪器主要采用载波相位观测值进行相对定位，定位精度高，一般相对精度可达 ±(5mm + 1ppm × D)。仪器的构造复杂，价格较贵，可用于大型考古遗址内的控制测量。

测地型接收机又分为单频机和双频机。单频机只接收 L_1 载波相位。由于单频不能消除电离层的影响，所以只适用于 15 公里之内的短基线。双频机接收 L_1、L_2 载波相位，可以消除电离层的影响，可适用于长基线。

3. 授时型接收机

这种接收机主要利用 GPS 卫星提供的高精度时间标准进行授时，常用于天文台授时、电力系统、无线电通信系统中的时间同步等。

4. 姿态测量型接收机

这种接收机可提供载体的航偏角、俯仰角和滚动角。主要用于船只、飞机及卫星的姿态测量。

6.4.2.2 按接收机通道数分类

GPS 接收机从捕获卫星信号到跟踪、处理、测量卫星信号的无线电器件称为信号通道。GPS 接收机定位至少要同步接收 4 颗卫星信号，同时最多可观测 11 颗 GPS 卫星，所以信号通道最多为 12 个。不同类型的接收机对卫星信号捕获方法也不同。

1. 多通道 GPS 接收机

同时有多个通道工作，每个通道跟踪一颗卫星。目前的接收机多为这种接收机。

2. 序贯通道接收机

通常只有两个信号通道，为了跟踪多颗卫星，采用分时依序的方法对各卫星进行跟踪测量，循环一周所需时间 20 毫秒，不能对卫星信号连续跟踪。早期接收机多用这种方法，优点是通道少，价格便宜。缺点是不能同步跟踪卫星，测量误差大。

3. 多路复用通道接收机

和序贯通道接收机相似，只是测量循环时间较短，小于 20 毫秒，可

以保证对卫星信号连续跟踪。目前这种接收机也逐步被多通道接收机代替。

6.5 GPS 控制测量

GPS 控制测量包括方案设计、外业测量和内业数据处理三部分。使用 GPS 进行控制测量可以避免地形等方面的局限，没有误差累积，适合于大型考古遗址内控制点的测量。

6.5.1 GPS 控制网设计

GPS 网的技术设计是进行 GPS 测量的基础。它应根据用户提交的任务书或测量合同所规定的测量任务进行设计。在 GPS 测量时由于不需要点间通视，控制点图形设计的灵活性比较大。GPS 网的设计应该兼顾以下问题：

1. GPS 控制测量一般使用三台接收机同时工作，最好是两台架设在已知控制点上，一台在未知点上，以增加检查条件，提高测量的可靠性。

2. 控制点至少与一个其他控制点通视，或者在控制点附近布设一个通视良好的方位点，以便建立联测方向，使用电子全站仪等仪器进行联测和扩展。

3. 要求至少有三个 GPS 控制网点与地面控制网点重合，才能求定 GPS 网坐标与原有地面控制网坐标之间的坐标转换参数。

4. 进行高程测量时，在测区内 GPS 点应尽可能与水准点重合，或者进行等级水准联测。

5. GPS 点应远离无线电发射台和高压线、大面积水域及电磁波反射（或接收）强烈的物体，周围环境应该视野开阔、交通方便。

设计工作结束后，再按照常规测量的方法到野外选点，建立测量标志。

6.5.2 外业观测

野外观测前，应该根据仪器数量、交通工具状况、测区交通环境及卫星预报状况制定作业调度表。作业表应包括：（1）观测时段（测站上开始接收卫星信号到停止观测，连续工作的时间段），注明开、关机

时间;(2) 测站号、测站名;(3) 接收机号、作业人员。野外观测时应严格按照技术设计要求开展工作。

1. 安置天线

天线安置是 GPS 精密测量的重要保证。要仔细对中、整平,量取天线高。天线高要用钢卷尺在互为 120°方向量三次,互差小于 3 毫米,取平均值后输入 GPS 接收机。

2. 安置 GPS 接收机

GPS 接收机应安置在距天线不远的安全处,有的型号的接收机可以安装在天线的支架上,连接天线及电源电缆,并确保无误。

3. 按顺序操作

按规定时间打开 GPS 接收机,输入测站名、卫星信号采样间隔等。具体情况参见仪器的操作手册。

一般情况下,GPS 接收机只需 3 分钟即可锁定卫星进行定位。若接收机超过 3 个月没有使用,仪器内的星历过期,需要 12.5 分钟来重新捕获卫星。GPS 接收机自动化程度很高,仪器一旦跟踪卫星进行定位,接收机自动将观测到的卫星星历、导航文件以及测站输入信息以文件形式存入接收机内。作业员只需要定期查看接收机工作状况,发现故障及时排除,并做好记录。接收机正常工作过程中不要随意开关电源,更改设置参数,关闭文件等。

一个时段的测量结束后,要查看仪器高和测站名是否输入,确保无误后再关机、关电源,迁移测站。

4. 观测数据下载及数据预处理

观测成果的外业检核是确保外业观测质量和实现定位精度的重要环节,所以外业观测数据在野外要进行严格检查,对外业预处理成果,按规范要求严格检查、分析,根据情况进行必要的重测和补测。确保外业成果无误后方可离开测区。

6.5.3 内业数据处理

1. 基线解算

对于两台及两台以上接收机同步观测值进行独立基线向量(坐标差)的平差计算,称为基线解算,也称观测数据预处理。

2. 观测成果检核

(1) 每个时段同步环检验

同一时段多台仪器组成的闭合环，其坐标增量闭合差应为零，但由于仪器开机时间不完全一致而会有误差，在检核中应检查一切可能的环闭合差。

（2）复测边检验

一条基线在不同时段被观测多次，有多个独立基线值，这些边称为重复边。

（3）异步环检验

在构成多边形环路的基线向量中，只要有非同步观测基线，则该多边形环路称为异步环。异步环检验应选择一组完全独立的基线构成环，然后进行检验。

3．GPS 网平差

在各项检查通过之后，得到各独立基线向量和相应协方差阵，在此基础上便可以进行平差计算。

（1）GPS 网无约束平差

利用基线处理结果和协方差阵，以网中一个点的 WGS-84 三维坐标为起算值，在 WGS-84 坐标系中进行网整体无约束平差。平差结果提供各控制点在 WGS-84 坐标系中的三维坐标、基线向量和三个坐标差，以及基线边长和相应的精度信息。

值得注意的是，由于起始点坐标往往采用 GPS 单点定位的结果，其值与精确 WGS-84 地心坐标有较大偏差，所以平差后得到各点坐标不是真正的 WGS-84 地心坐标。

（2）与地面网联合平差

在工程中常采用国家坐标系或城市、遗址局部坐标系，需要将 GPS 网平差结果进行坐标转换。若无条件与国家 GPS 网联测，则可以在网中联测原有的地面控制网，进行三维约束平差或二维约束平差，将原有点的已知坐标、已知距离及已知方位角作为强制约束条件。平差结果应是在国家坐标系或地方地标系中的三维或二维坐标。

约束平差后，将网中不参与约束平差的各控制点的坐标，与平差后该点的坐标求差进行校核。若发现有较大误差，应检查原地面点是否有误。

6.6 导航型 GPS 在考古调查中的应用

导航型 GPS 价格适中,操作简单,在考古调查中的应用比较广泛。现在导航型 GPS 的平面定位精度可以达到 10 米以内,高程定位精度更低一些,但是现在有的导航型 GPS 具有气压改正功能,提高了高程定位精度,这样的精度可以满足考古调查时测量遗址位置的需要,最后根据测量的数据将遗址标绘在 1:5 万甚至 1:1 万比例尺的地形图中。GPS 测量的结果有很多种表示方法,有经纬度表示的,也有使用各种坐标表示的,使用坐标表示时需要认真对待,否则就会产生严重的错误。

前文对经常使用的坐标系已经作了简单介绍。当 GPS 能够收到 4 颗及以上卫星的信号时,它能计算出本地的三维坐标:经、纬度和高程;若只能收到 3 颗卫星的信号,它只能计算出二维坐标:经度和纬度,这时它可能还会显示高度数据,但这数据是无效的。GPS 同时接收的卫星信号越多,时间越长,定位精度就会越高。

大部分 GPS 不仅能以经/纬度(Lat/Long)的显示点的位置,而且还可以用 UTM(Universal Transverse Mercator 即通用横轴墨卡托投影)等坐标系统显示测量结果。使用经纬度来表示平面位置时,可以根据经纬度的数值直接在地形图上标绘点位,其数值的表示方法应该选择"ddd°mm′ss. s″"。地球子午线长 39940. 67 公里,纬度改变 1°合 110.946公里,一秒合 30.82 米;赤道圈是 40075.36 公里,北京地区在北纬 40°左右,纬度圈长为 30699.51 公里,经度一度合 85.276 公里,一秒为 23.69 米,所以还是应该精确到秒的一位小数,否则会影响测量的精度。

一般情况下,GPS 显示的坐标为 WGS-84 坐标,它与中国的 1954 年北京坐标系和 1980 西安坐标系都是有很大的差距的,绝对不能将 WGS-84 坐标的坐标值不加转换地直接标绘在地形图上。WGS-84 坐标系与我国采用的坐标系有着一定的联系,所以两种坐标系中的坐标可以根据转换公式进行转换。不过现在很多型号的 GPS 手持机可以设置用户坐标系,如果输入相关的转换参数,就能够直接显示出所需坐标系的坐标。1954 年北京坐标系的参数有 5 个,分别如下:

Da = -108 米(WGS-84 与 1954 年北京坐标系之间椭球长半轴长之差)

Df = 0.0000005（扁率的倒数）

Dx、Dy、Dz 三个参数在不同地区会有所不同，需要从当地测绘部门获得。

另外还有其他的投影参数：需要计算出当地的 6°或 3°投影带的中央子午线经度，投影比例为 1，东西偏差 500000，南北偏差为 0。这样设置好，并存储自己的设置参数后，就可以直接得到 1954 年北京坐标系的平面坐标。

第七章　误差理论的基本知识

7.1　观测误差

在各项测量工作中不难发现，即使在同一观测条件下（由测量员使用同一仪器在相同的环境条件下工作），对同一量进行多次观测，所得到的观测值之间总是存在着一些差异，这就是说各个观测值包含着观测误差。误差来源有以下三方面原因：

1. 测量工作是借助测量仪器来完成的，每种仪器都具有一定的精确度，从而使观测结果受到一定的影响。例如使用只有厘米刻划的普通钢尺量距，就难以保证估读厘米以下尾数的准确性。此外，仪器加工和检校之后，本身还会存在一定的误差，对观测结果产生影响。例如全站仪水平度盘刻划不匀，会使水平角观测产生误差。

2. 观测者通过自己的感觉器官来进行工作，由于感觉器官的鉴别力与局限性，在进行仪器的安置、瞄准、读数等工作时，都会产生一定的误差。同时，观测者的技术水平、疲劳程度都会对观测结果产生不同的影响。

3. 在观测过程中所处的外界自然环境，如温度、湿度、风力、大气折光等因素都会使观测结果产生误差。而且这些因素随时都有变化，由此对观测结果产生的影响也随之变化，这就必然使观测结果带有误差。

总之，仪器、操作者和客观环境等三个方面是引起观测误差的主要因素，总称“观测条件”。不论观测条件如何，观测结果都含有误差。根据观测误差的性质，观测误差可分为系统误差和偶然误差两类。

1. 系统误差：在相同的观测条件下进行多次观测，误差在大小、符号上表现出相同性或变化规律性，如钢尺量距的尺长误差、地面弯曲对高差的影响等。系统误差的特性如下：

（1）同一性：绝对值是一个常量，并且按一定的规律发展；

（2）单向性：符号保持不变，总朝一个方向偏离；

(3)累积性:误差的绝对值随着单一观测的倍数累积。

2. 偶然误差:在相同的观测条件下进行多次观测,误差在大小、符号上表现出偶然性,即每一个误差的符号和大小都无法预知或能加以计算,但就总体而言有一定的统计规律,如角度测量中的照准误差、估读微小读数的误差等。

在观测过程中,系统误差和偶然误差常常混合在一起影响观测结果,其中系统误差在测量过程中具有累积的作用,对测量结果影响很大,但它具有独特的规律,能够在测量工作中运用各种措施将系统误差分离出来,采取对观测结果施加改正的方法来削弱其影响。于是,偶然误差就成了观测误差的主要成分,偶然误差的出现情况也就成了衡量观测值可靠程度的指标。

另外,在相同观测条件下对同一量进行多次观测后发现:大多数观测值都彼此接近,相差甚微,但有个别观测值相差较大。这一情况的出现可能是在观测或记录时出现了错误。这种由于工作中粗心大意等原因造成的现象,称为错误或粗差,不列为观测误差。这样的观测值必须予以废除(但要慎重),并进行重测。

在测量工作中,凡涉及观测误差的除有特殊说明之外,都是指消除系统误差后的偶然误差,所论述的各种结论和处理方法都是针对偶然误差而言的。

7.2 偶然误差的特性

在观测结果中主要存在偶然误差,为了研究观测结果的质量,以及如何根据观测结果求出未知量的最或然值,就必须研究偶然误差的性质。同时,任何一个观测值,客观上总是存在着一个能代表其真正大小的数值,这一数值称为观测值的真值。观测值与其真值之间的差数称为真误差,简称误差。

人们通过大量的测量实践发现,就单个偶然误差而言,其大小和符号没有规律,但在相同观测条件下,大量偶然误差确实呈现一定的统计规律性(偶然误差的特性)。例如在某地区,在相同的观测条件下,独立地观测了421个三角形的全部内角,计算出每一个三角形内角和的真误差:

$$\Delta i = L_i - 180° \quad (i = 1, 2, \cdots, 421)$$

Δ_i 是每个三角形内角和的真误差，L_i 是每个三角形三个内角观测值之和。现在将计算所得的 Δ_i 值，取 3″ 的间隔作区间，将它们按正负号与大小排列，统计出现于各误差区间的个数 v，其结果如表 7.1 所示。

表 7.1　误差分布表

误差区间 (3″)	正误差		负误差		合计	
	个数 v	相对个数 v/n	个数 v	相对个数 v/n	个数 v	相对个数 v/n
00 ~ 03	30	0.138	29	0.134	59	0.272
03 ~ 06	21	0.097	20	0.092	41	0.189
06 ~ 09	15	0.069	18	0.083	33	0.152
09 ~ 12	14	0.065	16	0.073	30	0.138
12 ~ 15	12	0.055	10	0.046	22	0.101
15 ~ 18	8	0.037	8	0.037	16	0.074
18 ~ 21	5	0.023	6	0.028	11	0.051
21 ~ 24	2	0.009	2	0.009	4	0.018
24 ~ 27	1	0.005	0	0	1	0.005
27 以上	0	0	0	0	0	0
和	108	0.498	109	0.502	217	1.00

从表 7.1 以及其他大量实验的统计结果，特别是观测值的次数较多时，可以总结出偶然误差有如下特性：

1. 界限性：偶然误差的绝对值不会超过一定的限度；

2. 单峰性：绝对值较小的误差较绝对值较大的误差出现的机率大；

3. 对称性：绝对值相等的正误差与负误差出现的机率相等；

4. 抵偿性：随着观测次数的无限增加，偶然误差的算术平均值趋近于零。

上述第四个特性是由第三个特性导出的。从第三个特性可知，在大量的偶然误差中，正误差与负误差出现的可能性相等，因此在求全部误差总和时，正误差与负误差就有互相抵消的可能。当误差个数无限增大时，真误差的算术平均值将趋于零。

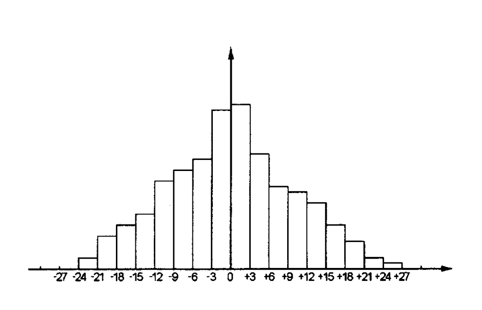


图 7.1　误差分布直方图

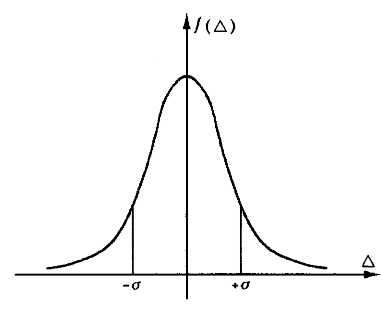


图 7.2　误差分布曲线

实践表明,对于在相同条件下独立进行的一组观测来说,不论其观测条件如何,也不论是对一个量还是对多个量进行观测,这组观测误差必然具有上述四个特性。而且,当观测的个数愈大时,这种特性就表现得愈明显。偶然误差的这种特性,又称为统计规律性。表 7.1 中的偶然误差特性,还可以用直方图来形象地反映出误差的分布情况(图 7.1)。图中以横坐标表示误差的大小,纵坐标表示各区间误差出现的相对个数除以区间的间隔值(本例是 3″)。随着观测次数的不断增加,误差区间的间隔无限缩小,图 7.1 中各长形顶边所形成的折线将变成一条光滑的曲线(图 7.2),称为误差分布曲线,其特点是能形象地反映出误差的分布情况。

7.3　衡量精度的指标

由于观测值不可避免地存在着误差,而且误差的大小和符号又不能预知和计算,因而,在一般情况下,观测量的真值是不能用观测的方法来获得的。测量工作中解决误差问题的方法是:(1) 依据多次观测值的数量来确定它们的最可靠值;(2) 说明观测结果的可靠程度(进行精度评定)。

在一定的观测条件下进行一组观测,它对应着一种确定的误差分布。如果分布较为密集,即小误差出现的相对个数大,表示该组观测质量较好,也就是说这一组观测精度较高;反之,如果分布较为离散,则表示该组观测质量较差,观测精度较低。

精度就是误差分布的密集或离散程度,那么分布愈为密集,表示该

组误差中绝对值小的误差所占的相对个数愈大，这样该组误差绝对值的平均值就一定愈小。所以一组误差绝对值的平均大小能够反映该组误差分布的离散程度。中误差就是观测误差平方和的平均数再开方。在测量工作中，观测个数总是有限的，为了评定精度，一般采用下述公式：

$$m = \pm\sqrt{\frac{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \cdots + \Delta_n^2}{n}} = \pm\sqrt{\frac{[\Delta\Delta]}{n}} \tag{7-1}$$

m 称为中误差。这里的方括号表示总和，$\Delta_i(i = l,2,\cdots,n)$ 为一组同精度观测误差。运用上式求一组同精度观测值的中误差 m 时，式中真误差 Δ 可以是同一个量同精度观测值的真误差，也可以是不同量同精度观测值的真误差。在计算 m 值时注意取 2～3 位有效数字，并在数值前冠以“±”号，数值后写上观测值的“单位”。

偶然误差第一特性说明，在一定的观测条件下，偶然误差的绝对值不会超过一定的限值，那么这个值是多大呢？根据理论知道，大于中误差的真误差，其出现的可能性约为 32%。大于两倍中误差的真误差，其出现的可能性约为 5%，大于三倍中误差的真误差，其出现的可能性只占 3%左右。因此测量中常取两倍中误差作为误差的限值，也就是在测量中规定的容许误差（或称限差）。有的测量规范中取三倍中误差作为容许误差。实际工作中，常以两倍或三倍中误差作为观测误差的极限值，称为极限误差。

如果观测值超过了极限误差，就认为该观测结果有错误而不予采用。所以极限误差理论为测量工作中排除错误指出了标准和依据。

对于评定精度来说，有时利用中误差还不能反映测量结果的精度。例如测量两段距离，一段长 100 米，另一段长 40 米，它们的中误差都是 ±6 毫米，虽然两次测量的中误差相同，但是单位长度的中误差不相等，所以两次的测量精度不同，前者优于后者。为此，利用中误差与观测值的比值，即$\frac{m_i}{L_i}$来评定精度，通常称此比值为相对中误差。相对中误差都要将其分子化为 1、分母取整数，即 1/N 的形式。

与相对误差对应的中误差、极限误差都是绝对误差。

7.4 误差传播定律

前文阐述了如何根据同精度观测值中误差来评定观测值精度的问

题。但在实际测量工作中，很多未知量的数值是不能直接观测的，需要首先观测其他未知量，并通过一定的函数关系间接地计算出来。那么观测值中误差与观测值函数中误差之间就存在着一定的关系，阐述观测值中误差与观测值函数中误差之间关系的定律，称为误差传播定律。

现以倍数函数关系为例，讨论误差传播公式如下：

设有倍数函数：$z = kx$　　　（a）

式中 z 为观测值的函数，k 为常数（无误差），x 为观测值，已知其中误差为 m_x，现在求 z 的中误差 m_z。

设 x 和 z 的真误差分别为 Δ_x 和 Δ_z。由（a）式可以知道 Δ_x 和 Δ_z 的关系为

$$\Delta_z = k\Delta_x$$

若对观测值 x 观测了 n 次，则

$$\Delta_{z_i} = k\Delta_{x_i} \quad (i = 1, 2, \cdots, n)$$

将上式平方，得

$$\Delta_{z_i}^{\ 2} = k^2\Delta_{x_i}^{\ 2} \quad (i = 1, 2, \cdots, n)$$

按上式求和，并除以 n，得

$$\frac{[\Delta_z^{\ 2}]}{n} = \frac{k^2[\Delta_x^{\ 2}]}{n} \tag{b}$$

根据中误差的定义，得知 $m_z^{\ 2} = \dfrac{[\Delta_z^{\ 2}]}{n}$，$m_x^{\ 2} = \dfrac{[\Delta_x^{\ 2}]}{n}$，于是（b）式可以写为

$$m_z^{\ 2} = k^2 m_x^{\ 2}$$

即倍数函数的中误差传播公式为

$$m_z = km_x \tag{7-2}$$

同样可以推导出其他函数的中误差传播公式，如表 7.2 所示。

表 7.2　中误差传播公式

函数名称	函　数　式	中误差传播公式
倍数函数	$z = kx$	$mz = \pm km$
和或差函数	$z = x_1 \pm x_2$ $z = x_1 \pm x_2 \pm \cdots \pm x_n$	$m_z = \pm\sqrt{m_1^{\ 2} + m_2^{\ 2}}$ $m_z = \pm\sqrt{m_1^{\ 2} + m_2^{\ 2} + \cdots + m_n^{\ 2}}$
线性函数	$z = k_1x_1 \pm k_2x_2 \pm \cdots \pm k_nx_n$	$m_z = \pm\sqrt{k_1^{\ 2}m_1^{\ 2} + k_2^{\ 2}m_2^{\ 2} + \cdots + k_n^{\ 2}m_n^{\ 2}}$

中误差传播公式在测量工作中的应用非常广泛，利用这些公式可以求得观测值函数的中误差，还能够用来研究容许误差值的确定，以及分析观测值可能达到的精度。

7.5 同精度观测值

7.5.1 算术平均值

在相同观测条件下，对某量进行了 n 次观测，其真值为 X，观测结果为 $l_1, l_2, \cdots, l_n$，观测值的算术平均值为 L，相应的真误差为 $\Delta_1, \Delta_2, \cdots, \Delta_n$，则

$$\Delta_i = l_i - X \qquad (i = 1, 2, \cdots, n)$$

在 $i = 1, 2, \cdots, n$ 时，将上式求和，

$$[\Delta] = [l] - nX$$

两边除以 n

$$\frac{[\Delta]}{n} = \frac{[l]}{n} - X = L - X \tag{7-3}$$

根据偶然误差的第四个特性，当 $n \to \infty$ 时，$\frac{[\Delta]}{n} \to 0$，所以，$L \approx X$。即当观测次数 n 无限增加时，算术平均值就趋近于观测值的真值。当观测次数有限时，可以认为算术平均值是根据已有观测数据能求得的最接近真值的近似值，称为最或是值（或最或然值）。每一个观测值与最或是值之差，称为最或是误差，用符号 $v_i (i = 1, 2, \cdots, n)$ 来表示：

$$v_i = l_i - L (i = 1, 2, \cdots, n)$$

求和

$$[v] = [l] - nL$$

于是

$$[v] = 0 \tag{7-4}$$

上式说明最或是误差的总和为零，在计算中可以用来进行检核。

当观测值次数无限增多，即 $n \to \infty$ 时，最或是误差 v_i 与真误差 Δ_i 相等；最或是值 L 与真值 X 相等。实际工作中观测次数总是有限的，认为 $v_i \approx \Delta_i, L \approx X$。

7.5.2 观测值中误差

根据公式（7-1），同精度观测值中误差的计算公式为

$$m = \pm\sqrt{\frac{[\Delta\Delta]}{n}}$$

其中 $\Delta_i = l_i - X \qquad (i = 1,2,\cdots,n)$

由于未知量的真值 X 无法确定，真误差 Δ_i 也是未知数，所以，不能直接利用上式计算观测值中误差，实际工作中一般利用观测值的改正数 v_i（与最或是误差的绝对值相等，符号相反）来进行计算。根据前文描述，最或是误差的公式为：

$$v_i = l_i - L \qquad (i = 1,2,\cdots,n)$$

真误差与最或是误差相减，并令 $\delta = L - X$：

$$\Delta_i - v_i = L - X = \delta$$

$$\Delta_i = v_i + \delta$$

取平方后再求和

$$[\Delta\Delta] = [vv] + n\delta^2 + 2\delta[v]$$

由于$[v] = 0$

$$[\Delta\Delta] = [vv] + n\delta^2 \tag{7-5}$$

又

$$\begin{aligned}
\delta^2 &= (L - X)^2 = \left(\frac{[l]}{n} - X\right)^2 \\
&= \frac{1}{n^2}(\Delta_1 + \Delta_2 + \cdots + \Delta_n)^2 \\
&= \frac{1}{n^2}({\Delta_1}^2 + {\Delta_2}^2 + \cdots + {\Delta_n}^2 + 2\Delta_1\Delta_2 + 2\Delta_1\Delta_3 + \cdots + 2\Delta_{n-1}\Delta_n)^2 \\
&= \frac{[\Delta\Delta]}{n^2} + \frac{2(\Delta_1\Delta_2 + \Delta_1\Delta_3 + \cdots + \Delta_{n-1}\Delta_n)}{n^2}
\end{aligned}$$

由于 $\Delta_1,\Delta_2,\cdots,\Delta_n$是偶然误差，则 $\Delta_1\Delta_2,\Delta_1\Delta_3,\cdots,\Delta_{n-1}\Delta_n$ 同样具有偶然误差的特性，所以当 $n\to\infty$ 时，上式等号右边的第二项趋近于零，于是

$$\delta^2 = \frac{[\Delta\Delta]}{n^2}$$

代入式(7-5)，两端同除以 n，得

$$\frac{[\Delta\Delta]}{n} = \frac{[vv]}{n} + \frac{[\Delta\Delta]}{n^2}$$

即

$$m^2 - \frac{1}{n}m^2 = \frac{[vv]}{n}$$

$$m = \pm\sqrt{\frac{[vv]}{n-1}} \tag{7-6}$$

式(7-6)为同精度观测中利用改正数计算中误差的公式,称为白塞尔公式。

7.5.3 最或是值中误差

设对某量进行了 n 次观测,观测值为 $l_1, l_2, \cdots, l_n$,观测值中误差为 m,最或是值为 L,则

$$L = \frac{[l]}{n} = \frac{1}{n}l_1 + \frac{1}{n}l_2 + \cdots + \frac{1}{n}l_n$$

根据误差传播定律,得

$$M = \pm\sqrt{\left(\frac{1}{n}\right)m^2 + \left(\frac{1}{n}\right)m^2 + \cdots + \left(\frac{1}{n}\right)m^2}$$

所以

$$M = \pm\frac{m}{\sqrt{n}} \tag{7-7}$$

式(7-7)为同精度观测中未知量最或是值中误差的计算公式。

第八章　摄影测量学

8.1　概　　述

8.1.1　摄影测量的定义与分类

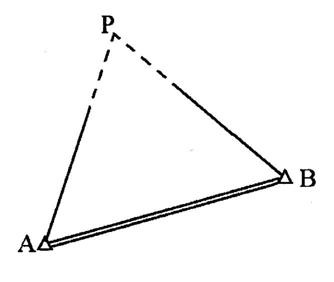


图 8.1　前方交会原理

摄影测量是一门通过摄影，对所获得的影像进行测量（特别是测绘国家基本比例尺地形图）的学科。摄影测量的基本原理是前方交会方法，在两个已知控制点 A、B 上架设全站仪，分别测量水平角∠PAB、∠PBA 和 AP、BP 方向的竖直角，然后根据观测值数据与已知点 A 和 B 的坐标值，计算未知点 P 的坐标。

摄影测量是在被测物体前的两个已知位置（称为摄站或摄影中心）摄取两张影像（左影像与右影像），然后在室内利用摄影测量仪器量测左右影像上同名点（空间同一个点在左、右影像上的像点称为同名点）的影像坐标，交会得到空间点的三维坐标。

由于左、右影像是同一个空间物体的投影，因此利用影像上任意一对同名点都能交会得到一个对应空间点，进行量测、交会，也能得到空间点的坐标。因此，摄影测量不仅仅可以测量一个空间的点，而且能利用影像重建和测量空间三维物体的模型，可以对“面”（影像）进行测量。

摄影测量的主要特点是在影像上进行量测，无须接触物体本身，一般不受自然和地理条件的限制，而且可以获得瞬间的影像。各种类型影像均是客观物体或目标的真实反映，信息丰富、逼真，可以从中提取研究目标的大量信息。

获取地面影像时，可以将摄影机（或传感器）安装在飞机、卫星或

地面上，相应的摄影测量可以分为航空摄影测量、航天摄影测量与地面（或近景）摄影测量。摄影测量最主要的对象是地球表面，用来测绘国家各种基本比例尺的地形图，为各种地理信息系统等提供基础数据。考古研究中可以使用摄影测量技术测绘遗址、建筑、石刻、器物等文化遗产的等值线图等，为文化遗产的研究和保护提供基础数据。

地面摄影测量既可以利用测量专用的摄影机（称为量测摄影机）进行，也可以利用一般的摄影机（称为非量测摄影机）进行。用于非地形测量的摄影测量称为近景摄影测量。在工业、建筑、考古、医学等测量领域具有广泛的应用。

8.1.2 摄影测量的发展

1851—1859 年法国陆军上校劳赛达特提出的交会摄影测量，被称为摄影测量学（Photogrammetry）的真正起点。最早的航空摄影照片是 1858 年纳达在气球上从空中拍摄地面的照片。

1903 年莱特兄弟发明了飞机，使航空摄影测量成为可能。第一次世界大战期间第一台航空摄影机问世。由于航空摄影比地面摄影具有明显的优越性（如视场开阔、能快速获得大面积地区的像片等），航空摄影测量成为 20 世纪以来大面积测量并绘制地形图最有效的快速方法。从 30 年代到 70 年代，主要测量仪器工厂所研制和生产的各种类型模拟测图仪器都是针对航空摄影测量的。模拟法摄影测量是指通过光学或机械方法模拟摄影过程，使两个投影器恢复摄影时的位置、姿态和相互关系，形成一个比实地缩小了的几何模型，即所谓摄影过程的几何反转，在此模型上的量测即相当于对原物体的量测，并通过机械或齿轮传动的方式将量测结果直接绘成各种图件。

1957 年，海拉瓦博士提出利用电子计算机进行解析测图的思想，限于当时计算机的发展水平，解析测图仪经历了近二十年的研制和试用阶段。直到 70 年代中期，随着电子计算机技术的发展，解析测图仪才进入了商用阶段。解析测图仪是世界上首先实现测量成果数字化的仪器。在机助测图软件控制下，将立体模型上测得的结果首先存贮在计算机中，然后再传送到数控绘图机上绘出图件。解析空中三角测量是用摄影测量方法快速、大面积地测定点位的精确方法，它是电子计算机用于摄影测量的第一项成果。在解析空中三角测量的长期研究中，人们解决了像片系统误差的补偿和观测值粗差的自动检测，从而保证

了成果的高精度和高可靠性。解析摄影测量的发展,使得非地形摄影测量不再受模拟测图仪的限制。其中近景摄影测量通过对所测目标进行各种方式摄影来研究和监测其外形和几何位置,包括不规则物体的外形测量、动态目标的轨迹测量、燃烧爆炸与晶体生长,病灶变化与细胞成长等不可接触物体的测量,在众多行业得到广泛的应用。

进入80年代,随着计算机技术的进一步发展,开始研究与发展数字摄影测量系统。90年代数字摄影测量系统进入实用化阶段,90年代末数字摄影测量系统开始全面替代传统的摄影测量仪器,摄影测量生产真正步入了全数字化时代。从广义上讲,数字摄影测量指的是从摄影测量和遥感所获取的数据中,采集数字化图形或数字化影像,在计算机中进行各种数值、图形和影像处理,研究目标的几何与物理特性,从而获得各种形式的数字产品和可视化产品。

数字摄影测量又称为全数字化摄影测量,是基于数字影像和摄影测量的基本原理,应用计算机技术、数字影像处理、影像匹配、模式识别等多学科的理论和方法,提取所摄对象用数字方式表达的几何信息和物理信息。它处理的原始信息不仅可以是像片,更主要的是数字影像或数字化影像;它是以计算机视觉代替人眼的立体观测,因而计算机技术、特别是图形工作站的发展为数字摄影测量的发展提供了广阔的前景,其产品是以数字形式记录的多种信息,常见的为数字地形图。

综上所述,摄影测量经历了模拟法、解析法和数字化三个发展阶段,而数字摄影测量的内涵已远远超过传统摄影测量的范围。数字摄影测量是以计算机视觉代替人眼的立体观测,真正实现了摄影测量自动化。计算机及其相应外部设备的发展,为数字摄影测量提供了广阔的发展前景。数字摄影测量产品是多种多样的数字图形,满足各种领域的生产和研究需要。

8.2 摄影测量学的基本原理

摄影测量来自测量的交会,利用影像进行量测。更确切地说,它是利用每个影像的像点摄影光线(量测时称为投影光线)进行交会,获得对应点的物方空间坐标。

成像过程中,三维空间点 A(X,Y,Z)、摄影中心 S(X_S,Y_S,Z_S)与对应像点 a(x,y)一定位于同一条直线上,即“三点共线”,可用共线方程

进行描述(图 8.2)。这是摄影测量的基本方程式,贯穿于整个摄影测量,应用于摄影测量的空间后方交会、空中三角测量、数字测图、数字(正射)纠正等各个方面。

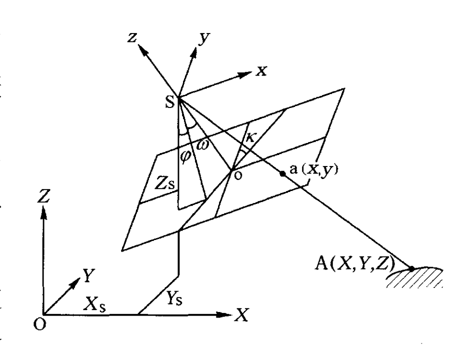


图 8.2 摄影机外方位元素

为了利用投影光线进行交会,必须恢复摄影影像上每一条投影光线(直线)在空间的位置与方向,这就必须引入摄影机的内、外方位元素。

8.2.1 摄影机的内方位元素

从几何上理解,摄影机是一个四棱锥体,顶点是摄影机的物镜中心 S,底面是摄影机的成像平面(影像)(图 8.3)。摄影中心到成像面的距离称为摄影机焦距 f,摄影中心到成像面的垂足 O 称为像主点,SO 称为摄影机主光轴。主点离影像中心点的位置 x_0、y_0 确定了像主点在影像上的位置。f、x_0、y_0 称为摄影机的内方位元素。

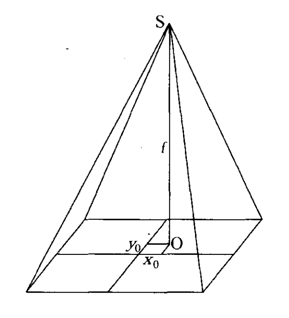


图 8.3 摄影机内方位元素

内方位元素可以通过摄影机检校(在计算机视觉中称为标定)获得。测量专用的摄影机在出厂前由工厂对摄影机进行过检校,其内方位元素是已知的,则称为量测摄影机,否则称为非量测摄影机。

在加工、安装过程中,摄影机物镜存在一定的误差,使物方平面上直线的影像不是直线,这种误差称为物镜的畸变差。测量摄影机检校时必须同时测定畸变差参数。量测摄影机的畸变差较小,非量测摄影机的畸变差较大。

8.2.2 摄影机的外方位元素

摄影机的内方位元素只能确定摄影光线(图 8.2 中的 Sa)在摄影机内部的方位,但是它不能确定投影光线 Sa 在物方空间的位置,此时

投影光线 Sa 并不指向空间点 A。如果确定投影光线 Sa 在物方空间的位置,就必须确定(恢复)摄取影像时摄影机的“位置”与“姿态”,即摄影时摄影机在物方空间坐标系中的位置 X_S、Y_S、Z_S 和摄影机的姿态角 φ、ω、κ,这 6 个参数就是摄影机的外方位元素。在恢复摄影机的内外方位元素后,投影光线 Sa 通过空间点 A,即三点共线,可以建立共线方程,解求 A 点的三维坐标。

8.2.3 恢复(获得)外方位元素的方法

摄影机内方位元素是通过摄影机的检校获得。因此,摄影测量的关键工作是获得摄影机的外方位元素。获得摄影机的外方位元素的方法主要有空间后方交会、空中三角测量与区域网平差、相对定向与绝对定向以及在摄影过程中直接获取。

摄影测量后方交会则是空间后方交会,利用地面上至少三个已知点 A(X_A,Y_A,Z_A)、B(X_B,Y_B,Z_B)、C(X_C,Y_C,Z_C)与其影像上三个对应的影像点 a、b、c 的影像坐标(x_a,y_a)、(x_b,y_b)、(x_c,y_c),解求影像的外方位元素。每个已知点可以列出两个共线方程,三个已知点可以列出 6 个方程,因此可以解求 6 个外方位元素 X_S、Y_S、Z_S、φ、ω、κ。由于存在测量误差,进行空间后方交会的地面已知控制点应多于 4 个,然后求解 6 个外方位元素。

8.3 航空影像的特征及其判读

航空摄影是在飞机上安装航摄仪,对地面进行垂直摄影,获得航摄像片或数字影像。航空摄影测量就是运用航空摄影获得的影像,进行测绘与制图。航摄像片是航空摄影测量的基础资料,其质量好坏将直接影响成图的精度。

航摄比例尺通常按成图比例尺、成图方法和地形特点来选择,一般可将航摄像片放大 4 ~6 倍来制成地形图。航摄胶片按感光材料不同,可分为黑白片、彩色片、红外片等。航摄像片的比例尺大,分辨率高,几何关系稳定,能够根据航片信息来绘制成地形图。航空摄影获得航摄像片的底片(负片),晒印后即得到航摄像片(正片)。我国摄制的航摄像片,像幅主要有 18 厘米 ×18 厘米和 23 厘米 ×23 厘米两种。

8.3.1 航摄像片的边框注记

各种航摄机所摄制的航摄像片，都印有一些摄影状态的记录（图8.4），主要内容有：

1. 框标　位于航摄像片四边的中间或四角。相对的两个框标的连线，其交点是航摄像片的坐标原点，称为航摄像片的中心点，通常和像主点重合，但在航摄机镜头装配时往往会产生误差，使镜头光轴并不交在航摄像片中心点上，但其误差甚小，与焦距一起称为摄影机的内方位元素。

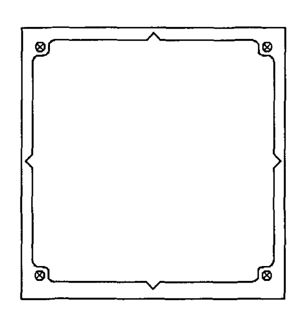


图8.4　航空影像的框标

2. 压平线　为了检查负片贴压在贴附框的平面状态，有些航摄仪在贴附底片的框架上，装有四条成井字形的金属细线，称为压平线。摄影时压平线也被摄在底片上，在大多数18厘米×18厘米的航摄像片上都印有压平线，观察压平线是否为直线影像，可以概略检查负片的压平程度。如果负片没有压平，则压平线的影像为曲线和虚影。

3. 圆水准器　用以了解摄影瞬间航摄像片的倾斜方向和倾斜角。圆水准器每圈为1°，读数时从中心算起。现代航摄仪中的回转稳定装置，可以使光轴与垂线间的夹角很少超过20′。当光轴的偏斜角度不超过±3°，即水准器中气泡偏移中心少于三圈时，航摄的像片合格。

4. 时表　记录本张航摄像片摄影瞬间的时间，以便推算摄影时的太阳高度角。

此外还有表示航摄日期和航摄像片的编号等注记。

8.3.2 航空摄影测量对像片的质量要求

飞机摄影时是对被摄区按航线进行摄影（图8.5）。航摄像片是航摄成图的基础，其质量直接影响成图精度。根据规范对航摄像片有以下要求：

1. 飞机在飞行航线上相邻两张像片的重叠称为航向重叠，要求不小于60%；相邻两条航线间像片的影像重叠称为旁向重叠，不小于30%。航向重叠的目的是为了利用重叠部分，在立体观察下建立与实

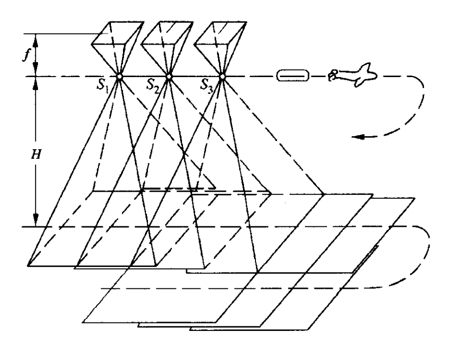


图 8.5　航空摄影的航线

际相似但又缩小的地面立体模型，以便进行内业测图。旁向重叠是为了防止出现摄影漏洞，并满足相邻航线的像片拼接的要求。

2. 像片的倾斜角，即摄影时摄影光轴与铅垂线的夹角一般不应大于 2°。

3. 航偏角是指像片边缘与航线方向的夹角，一般不大于 6°，最大不应超过 10°，并且不得连续三张像片超过 6°。

4. 航线弯曲度是指航摄像片的像主点离开航线最大偏离值，与航线全长之比不大于 3%。

5. 在同一航线上，飞机航高 *H* 变化应保持在 ±20 米；不利气象条件下不应超过 ±50 米。飞机的航高与像片比例尺有关。像片比例尺是根据成图比例尺来确定的。航摄比例尺越大，地物影像越细致，成图精度也越高。但是单张像片拍摄面积小，拍摄照片多，成图时间长，成本高。

6. 像片影像要清晰，色调要一致，反差要适中。影像清晰、色调一致有利于正确地识别地面物体种类、形状及准确位置。

反差是指影像的黑白差别。若反差太大，物体细节显示不出来；反差太小，影像浅淡，物体分辨不清。

要达到上述要求，摄影时要选择晴朗无云的天气，在事先选定的测区范围内规划好航线，进行连续摄影。摄影过程可用 GPS 导航，保持预定航线、航高、航速及机身的水平。

8.3.3　航摄像片的几何特性

1. 航摄像片是地面的中心投影。空间任意一点与某一固定点的连线，被一投影平面所截，则直线与平面的交点称为空间点的中心投影。中心投影与正射投影不同，中心投影构成的影像与地面物体不完全相似，没有统一的比例尺。当中心投影的物距无穷远时，投影光线与物面垂直，成为正射投影。

2. 中心投影的成像规律：点的像仍然是点；直线的像一般是直

线，有时为点；空间相交直线的像仍然为相交直线，其交点就是空间直线的交点；平面曲线的像一般为曲线，当包含曲线的平面通过投影中心时，则该曲线的像为一直线；不在同一平面内的空间曲线的像是曲线。

中心投影的航空像片上，由于地物高出地面或地形起伏，地面点在像片上的构像与该地面点在同一基准面上的正射投影点之间，存在因高差引起的像点位移，称为投影差。当像片倾角小于3°时：

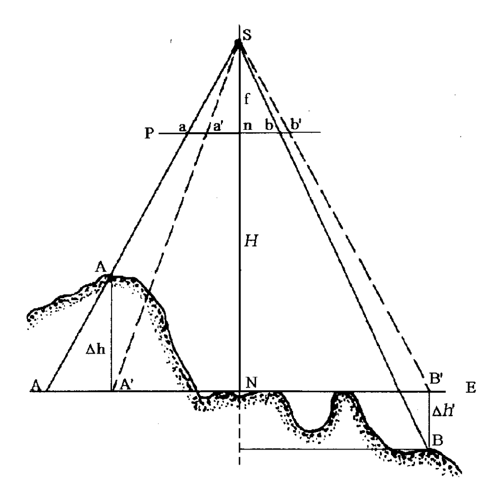


图8.6 摄影产生的投影差

$$\delta = \frac{r}{H} \cdot h$$

其中：δ 为投影差，r 为向径，即像点至像底点（主点）的距离，h 为地面点相对基准面的高差，H 为摄影航高。

根据投影差计算公式，得知像片影像的位移规律：(1) 像片影像位移的大小，视地面物体与基准面的高差 h 而定，高差愈大，引起的像点位移也愈大，反之就小；(2) 像片影像位移的大小与像点距主点的距离成正比：愈靠近像片的边缘，影像的位移愈大。

8.3.4 像片判读的基本原理

像片判读也称像片解译或判释。它是依据地物光谱特性和影像成像规律，阅读和分析图像，识别和解译空间物体，并从图像上获取有用信息的过程。像片判读之前应该全面了解像片资料，掌握像片的类型、比例尺、摄影时间、地物地貌类型等参数，然后集中精力详细研究地物、图案及其相互关系，并结合地形图和其他参考资料进行比较，得出正确的结论。

航摄像片时，从两个摄影站对同一目标重叠摄取两张像片，就是为了构成被摄目标的立体视觉模型。立体观测应具备的条件有：

1. 必须在两个不同位置对同一物体摄取两张像片，称为立体

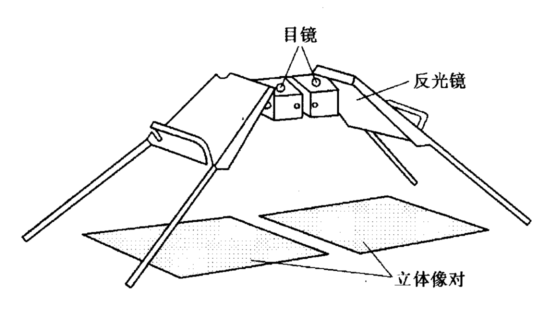


图 8.7 反光立体镜观察立体像对

像对。

2. 左、右像片分别安放在左、右两边，两张像片上同名像点连线与眼基线平行。

3. 两张像片的距离适合人眼交向和凝视能力。

4. 立体观测时，每只眼睛只能同时分别看一张像片，称为“分像”。

为了帮助分像，实践中常采用反光立体镜（图 8.7）、红绿眼镜或偏振光眼镜进行辅助。反光立体镜有放大和分像作用，将立体像对置于立体镜下，用双眼观测。左、右眼分别看左、右像片。在人眼视觉中左右影像相交产生立体感，经过训练后人眼可以自己分像进行立体观察。通过立体观察可以准确地分析地表情况，对影像做出正确的解译。

8.4 航空摄影测量

8.4.1 航空摄影控制测量

航空摄影测量也遵循测量工作“从整体到局部”，“先控制后细部”的原则。因此，在已有大地控制测量成果和航摄资料的基础上，按航测内业的需要，有必要在野外补测（加密）一定数量的控制点。它的任务是测定航测内业所需的像片控制点。其目的是把航摄资料与大地测量成果联系起来，使内业的像片测量具有与地面测量相同的控制基础。

航测外业控制测量是先在像片上确定控制点的范围，选刺出目标明显并能在实地施测的点位，然后到野外运用经纬仪、电子全站仪、GPS 等进行控制测量。

8.4.2 航摄像片调绘

航摄像片全面反映所摄地面的真实情况。根据航摄像片的成像规律和特征，并到实地作对照，可识别像片上各种影像所反映的地物、地貌。根据用图要求，进行适当的综合取舍，按地形图图式规定的符号将

地物、地貌元素描绘在相应的影像上，并作各种注记，然后进行室内整饰。这些工作，统称为像片判读和调绘。

像片调绘主要为内业测图提供可靠资料，是航测成图过程的一项重要工作。调绘时，如果判读、描绘不正确，综合取舍不恰当，调查及量测、注记有错误，在内业测图中将无法完全纠正，直接影响成图质量。

调绘方法一般是沿着事先计划好的调绘路线进行，边走、边判读、边绘制。野外先用铅笔在像片上描绘，然后在室内着色整饰。像片调绘的结果应该是内容符合要求，且清晰易读。

8.4.3 摄影过程的几何反转

立体摄影测量是对相邻的两张影像建立立体模型，测绘地形图或建立数字地面模型等。

恢复影像（摄影机）外方位元素实际是摄影过程的几何反转，它是摄影测量的一个基本原理。图8.8表示从空中对地面摄影，S_1、S_2是两个摄站，摄得两幅影像P_1、P_2，两个摄站之间的距离称为基线（Baseline）。若将影像P_2沿着摄影基线反方向移动到S_2'，可以设想如果不直接对实际地面摄影，而是对地面模型摄影，同样可以获得两张完全一样的影像P_1、P_2。

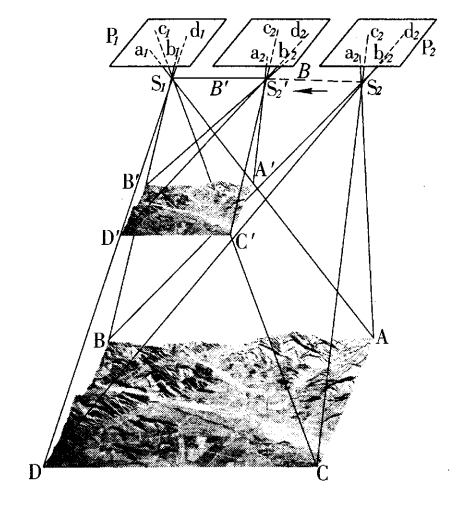


图8.8 摄影过程的几何反转

据此可以设计两个与摄影机一样的投影器，将航空摄影所得到的相邻影像放置在投影器内，在恢复左、右两个投影器的外方位元素后，左、右两个投影器的投影光线就会“对对相交”，它们的交点就构成地面的几何模型。

多数模拟测图仪是利用机械投影器，由两根精密的金属导杆代替投影光线，构成机械投影器，实现几何反转。解析测图仪运用数字导杆（共线方程）代替机械导杆，由手轮、脚盘的转动向计算机输入地面坐标(X,Y,Z)，然后由计算机计算共线方程，即由X、Y、Z求得对应的像点坐标(x',y')与(x'',y'')，分别输出给左、右像片盘（或观测系统）并实

时驱动它们的运动，使作业员在转动手轮、脚盘的同时，始终能在观测系统中观测到对应的像点，从而实现摄影过程的几何反转。数字摄影测量工作站（Digital Photogrammetric Workstation，DPW）实现摄影过程的几何反转与解析测图仪的原理相同，不同之处在于没有像片盘，影像显示在计算机显示器屏幕上，有时用三维鼠标代替手轮、脚盘。

8.4.4 立体像对的相对定向

相对定向是确定一个立体像对两张影像的相对位置，用于建立地面立体模型。相对定向的唯一标准是两张影像上同名点的投影光线对对相交，所有同名点的交点集合构成地面的几何模型（简称地面模型）。一般确定两张影像的相对位置有两种方法：(1) 将摄影基线固定水平，称为独立像对相对定向系统；(2) 将左影像置平（或将其位置固定不变），称为连续像对定向系统。

在模拟、解析测图仪上利用 6 个点位的上下视差进行相对定向。在数字摄影测量工作站中，首先需要进行内定向，根据系统内框标模板匹配，自动识别影像的框标，实现内定向自动化。然后再根据计算机的影像匹配替代人眼自动识别同名点，进行相对定向，DPW 进行相对定向所用的点数远远超过 6 个点。

8.4.5 立体模型的绝对定向

相对定向建立了几何模型，但模型大小不确定、坐标原点是任意的，模型坐标系与地面坐标系也不一致。为了使所建立的模型能与地面一致，还需利用控制点对立体模型进行绝对定向。绝对定向是对相对定向所建立的模型进行平移、旋转和缩放。

通过相对定向建立立体模型，再通过立体模型的绝对定向，可恢复立体模型的绝对方位，使模型与地面坐标系一致，恢复了两张影像的外方位元素，因此通过相对定向和绝对定向与两张影像各自进行后方交会恢复的两张影像外方位元素是一致的。

8.4.6 核线与核线影像

核线是通过基线的平面（称为核面）与影像的交线。不同的核面与影像有不同的交线，同一核面与左、右影像的交线为同名核线。在已知同名核线的条件下，影像匹配（搜索同名点）的问题就由二维（平面）

匹配转化为一维(直线)匹配。

核线在数字摄影测量中是一个重要概念,按核线排列所获得的影像称为核线影像,在核线影像上没有上下视差。DPW 中的立体影像经过绝对定向后便可以进行核线排列,得到核线影像。

8.4.7　空间前方交会

由两张影像上的同名点确定对应地面点的坐标,称为空间前方交会。确定影像的方位元素后,作业员只要找准影像上的同名点,就能获得该点的空间坐标。在模拟测图仪上,空间前方交会是由仪器的光学、机械装置实现的,而解析测图仪与 DWP 的空间前方交会是由计算机解析计算完成的。通过已知左、右影像的 12 个外方位元素与两个同名像点的坐标 $a_1(x_1,y_1)$、$a_2(x_2,y_2)$,就能求得物方点 A 的空间坐标(X,Y,Z),实现测量成图的目的。

8.4.8　测绘地貌

在摄影测量所建立的地面模型上测绘等高线,一般是保持 Z 为常数(脚盘不动),连续转动左、右手轮,并保持目镜中的测标永远贴在地面模型上,这样物方点的运动轨迹就是等高线。地物测绘也是通过立体观测方式,确定特征点的位置,绘制成图。

DPW 中可以在核线影像上自动进行一维影像匹配,有两种方式:其一是在核线影像上进行特征点匹配,即首先在核线影像上提取特征点,再对特征点进行匹配、搜索同名点;其二是在核线影像上按一定的间隔生成格网,并以格网交点作为目标点,进行匹配、搜索同名点。

获得密集的同名点后,再进行空中前方交会、内插,解求其三维坐标,才能得到数字高程模型(DEM)。并由此生成三角网模型,最终生成等高线。各种地物的测绘需要在立体观测模式下,测量特征点,然后绘制成图。

8.5　摄影测量产品在考古工作中的应用

摄影测量能够得到等值线图、轮廓线图、数字高程模型和正射影像图及其相互叠加的丰富多样的产品。正射影像就是地面在地平面上的垂直投影,其生成过程是首先将地面上的 DEM 格网点投影到影像上,

每四个 DEM 的格网在影像上的投影将原始影像分成一个个影像块，然后将每个影像块内插到对应的 DEM 方块中，即得正射影像。

若将等高线与正射影像叠合，就得到带等高线的正射影像图。正射影像图与地图一样，是地面在地平面上的正射投影，具有量测性，可以根据正射影像对旧地形图上的地物进行修测。在考古与遗产保护工作中正射影像的应用非常广泛，文物的正射影像叠加等值线和轮廓线之后，能够为文物研究和保护提供丰富的信息（图8.9）。

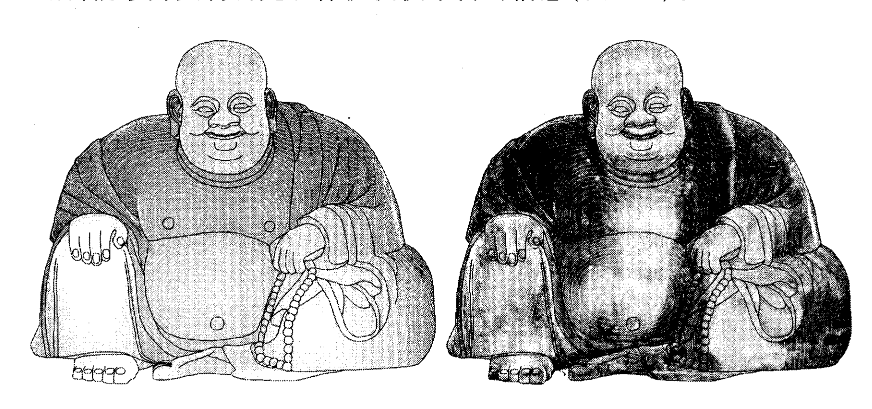


图 8.9　佛像的 DEM、正射影像叠加等值线与轮廓线图

获得正射影像图之后，就可以将其调入 AutoCAD 或地形图数字化等软件中进行绘图。这种方法绘图的精度很高，勾绘的纹饰非常准确，而且对于不够清晰的部分可以放大底图进行绘制，线条绘制完毕即可得到遗址或器物的矢量图形，最后可以根据设定的比例打印输出，也可以通过 Illustrator 等软件输出成栅格图形（图 8.10）。

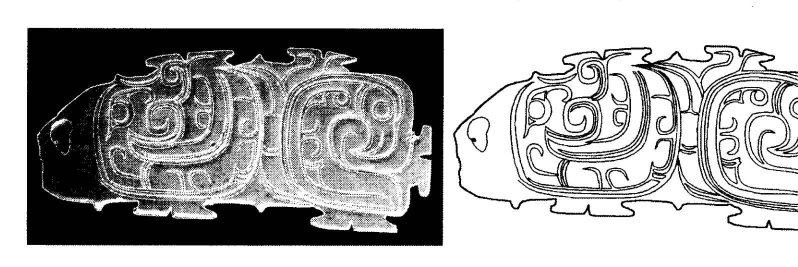


图 8.10　根据正射影像图绘制线图

第九章　遥感技术基础

9.1　遥感概述

9.1.1　基本概念

9.1.1.1　遥感

遥感(Remote Sensing)是20世纪60年代发展起来的新兴的综合性科学技术,它建立在空间科学、光电技术、地学规律、数理方法和计算机技术等学科的基础上,并随着相关学科的发展而发展。遥感即遥远感知,是指在不直接接触有关目标物的情况下,从距离地物几公里到几百公里的飞机、飞船、卫星等遥感平台上,使用光学或电子光学仪器(即传感器)接收地面物体反射或发射的电磁波信号,并以图像胶片或数据磁带记录下来,传送到地面,经过信息处理、判读分析和野外实地验证,最终服务于资源勘探、动态监测和有关部门的规划决策。通常把整个接收、记录、传输、处理和分析判释遥感信息(物体电磁波的能量信息)的全过程统称遥感技术,包括遥感手段和遥感应用。

遥感分为广义遥感和狭义遥感,广义遥感以电磁波、声波、地震波、力场作为媒介,远距离地使用仪器对物体的性质进行探测。因此,航海测探、航海物探、航空物探、航空摄影测量、地震测量、环境监测等都包括在广义遥感的范畴之内。狭义遥感是单指以电磁波作为媒介的遥感手段。它包括可见光遥感、红外遥感、微波遥感、紫外遥感和多波段遥感。

9.1.1.2　遥感平台

遥感中搭载传感器的工具统称为遥感平台(Platform)。遥感平台包括人造卫星、航天航空飞机乃至气球、地面测量车等。气象卫星GMS风云2号等地球同步静止轨道卫星的高度最高,位于赤道上空36000公里的高度上。其次是高度为400~1000公里的地球观测卫星,如Landsat、SPOT、CBERS等系列以及IKONOS、QUICKBIRD等高分

辨率卫星，它们大多使用能在同一个地方进行相同时间观测的极地或近极地太阳同步轨道。其他按高度排列主要有航天飞机、探空仪、超高度喷气飞机、中低高度飞机、无线电遥控飞机乃至地面测量车等。

静止轨道卫星又称地球同步卫星，它们位于30000公里外的赤道平面上，与地球自转同步，所以相对于地球是静止的。不同国家的静止轨道卫星在不同的经度上，以实现对该国有效的对地重复观测。

圆形轨道卫星一般又称极轨卫星，是太阳同步卫星。它使得地球上同一位置能重复获得同一时刻的图像。该类卫星按其过赤道面的时间分为AM卫星和PM卫星。一般上午10:20通过赤道面的极轨卫星称为AM卫星，下午1:30通过赤道的卫星称为PM卫星。

9.1.1.3　遥感传感器

地物发射或反射的电磁波信息，通过传感器收集、量化并记录在胶片或磁带上，然后进行光学或计算机处理，最终才能得到可供几何定位和图像解译的遥感影像。

遥感信息获取的关键是传感器。由于电磁波随着波长变化其性质有很大的差异，地物对不同波段电磁波的发射和反射特性也不大相同，因而接收电磁辐射的传感器种类极为丰富。但尽管如此，传感器一般具有共同的结构，由收集系统、探测系统、信号处理系统和记录系统四个部分组成。只有摄影方式的传感器探测与记录同时在胶片上完成，无须在传感器内部进行信号处理。

9.1.2　遥感的类别

根据遥感技术所采用的原理、技术和研究角度的不同，以及遥感应用领域的差异，可以将遥感技术分成不同的类别。目前主要根据遥感平台、电磁波射源、传感器的工作波长、获取的遥感资料和研究对象及应用领域等的不同进行分类(图9.1)。

9.1.2.1　根据遥感平台分类

根据遥感平台高度的不同，可将遥感技术划分为航天遥感、航空遥感与地面遥感。

航天遥感是通过卫星、宇宙飞船、航天飞机等在太空(距地面80公里以上的地球大气层外层空间)里进行的遥感。

航空遥感是通过飞机、升空气球等航空飞行器在地球大气层内层空间中对地面目标进行的遥感。

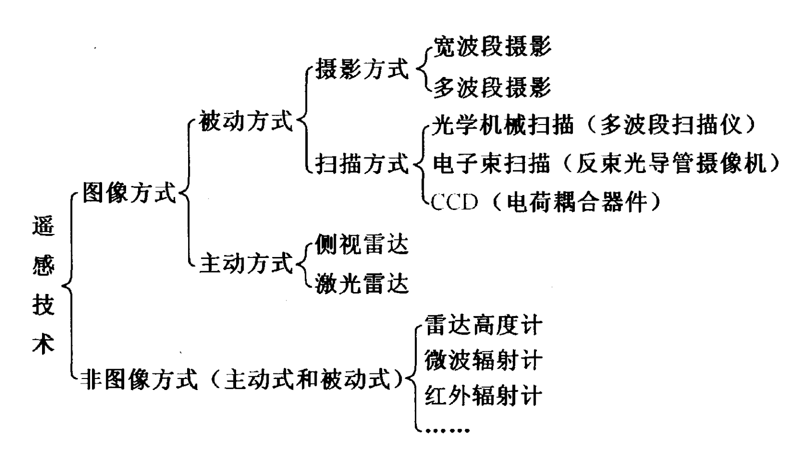


图 9.1　遥感技术的分类

地面遥感是通过伸臂汽车(遥感车)、铁塔、高台或船舶作为平台，或由人直接携带和操作遥感仪器对地面、地下或水下进行的遥感。

9.1.2.2　根据电磁波辐射源分类

根据遥感过程中传感器接收信息方式的不同，可将遥感分为主动遥感和被动遥感。

主动遥感是指在遥感平台上，发射机主动发出电磁波、超声波等信号，并接收和记录从目标物或现象反射回来的信号，经光学或计算机影像处理后，对其信息的特征进行分析和解译。如机载合成孔径侧视雷达扫描成像即属典型的主动遥感。

被动遥感是遥感过程中所接收的信息是目标物或现象对太阳辐射的反射与散射，或在一定的温度下，目标物或现象自身向外辐射的能量信息。多数的遥感探测属于被动遥感。

9.1.2.3　根据传感器工作波长分类

现代遥感技术所能利用的电磁波范围已经由可见光波段，扩大到紫外、红外和微波。不同波段的电磁波由于其波长不同、信息特征各异，满足不同的研究需要。

可见光遥感主要研究利用目标物在可见光波段的反射能量。采用的传感器主要包括常规摄影传感器和多光谱摄影传感器、反束光导管摄像机、多光谱光学机械扫描仪以及多光谱固体自扫描式传感器等。

红外遥感指研究和利用物体反射和发射的红外辐射能量，一般使

用常规摄影传感器和红外感光材料也能在近红外波段进行摄影成像。而对中、远红外的利用,主要采用热红外扫描成像,可实现全天时探测。

微波遥感是收集和记录属于无线电波中的微波能量,根据电磁波辐射源的不同,可分为主动微波遥感(比如合成孔径侧视雷达成像)和被动微波遥感(如微波辐射计探测)。微波对一些地物具有一定的穿透能力(如云、雾、植被、土壤等),可以实现全天时、全天候探测。

9.1.2.4 根据获取的遥感资料分类

遥感过程中获取的资料有很大的差异,有的遥感方式能够获得目标物的图像资料,称为有影像方式遥感。有的遥感方式只能获得目标物的一些数据或曲线记录,称为无影像方式遥感。其中有影像方式的遥感又分为:摄影方式遥感(用光学原理,摄影成像方法,获得图像资料)和非摄影方式遥感(运用光电转换原理,扫描成像方法,获得图像资料)。

9.1.2.5 根据研究对象分类

遥感技术不仅仅能够对地球进行研究,而且能够探测月球、火星、金星、日地空间,以至太阳系以外的宇宙。根据研究对象的不同可以将遥感分为宇宙遥感和环境遥感两类。

宇宙遥感是指对地球以外太阳系的行星及外太空天体进行遥感研究的科学。

环境遥感则是以观测人类居住的地球为主要研究对象。

9.1.2.6 根据应用领域划分

遥感技术已经在矿产、农林、地理、海洋、气象、地质等方面得到普遍应用,同时出现了按照应用领域分类的方法。例如,海洋探测方面的遥感叫海洋遥感,地质勘测方面的遥感叫地质遥感,考古遗迹勘探与信息提取方面称为考古遥感,等等。

9.1.3 遥感发展概况

1858年纳达在气球上从空中拍摄地面的照片。1903年莱特兄弟发明了飞机,使航空遥感成为可能。第一次世界大战后,由于军事上的需要,航空摄影得到了迅速发展,第一台航空摄影机问世,使航空摄影的应用领域逐步扩展到众多的民用行业。第二次世界大战以后,随着彩色、近红外等新型感光胶片的应用和光电技术的进步,从紫外一直到红外及微波波段传感器的研制成功和应用,扩展了通过常规航空摄影

所能感受、记录的电磁波波长范围，形成了具有可见光、红外、多光谱、微波等遥感手段和设备的航空遥感技术系统。由于航空摄影视野开阔，无前景挡后景现象，可快速获取大面积的像片，比地面摄影有明显的优越性，使航空摄影技术得到飞速的发展，应用领域迅速扩大到环境科学、地质学、地理学、农学、林学等众多领域，成为对自然资源进行勘察和研究的重要手段。

1957 年前苏联发射了第一颗人造卫星，使卫星摄影测量成为可能，开创了人类空间活动的新纪元。1959 年从人造卫星发回第一张地球像片，1960 年从"泰罗斯"与"雨云"气象卫星上获得全球的云图。1971 年美国"阿波罗"宇宙飞船成功地对月球表面进行航天摄影测量。同年美国利用"水手"号探测器对火星进行测绘作业。1972 年美国地球资源卫星（后改称陆地卫星）上天，获取的多光谱扫描仪（MSS）影像用于对地观测，使遥感作为一门新技术得到广泛应用。航天技术的迅速发展，各种传感器的不断改进和创新以及数据接收处理系统的相继发展和不断完善，使遥感技术逐步形成一个由地面到空间立体化的动态探测、传输与处理信息的技术系统。

卫星遥感从实验到应用、从单学科到多学科综合、从静态到动态、从区域到全球、从地表到太空，已经发展到相当成熟的阶段，取得了令人瞩目的成绩。当代遥感技术的发展主要表现在它的多传感器、高分辨率和多时相特征上，小卫星的重访周期在 3～5 天，商用卫星影像的分辨率达到 60 厘米，军用卫星的分辨率达到 10 厘米。遥感技术极大地开阔了人们观察地球的视野，提高了鉴别分析观测目标的能力，实现了全球性的资源勘察和环境动态监测的研究与应用，使遥感进入了航天遥感的新阶段。

9.2 遥感物理基础

9.2.1 电磁波谱

自然界中各种目标物的组成和结构不同，其物理化学性质各异，反射或发射各种波长电磁波的能量也不相同。遥感技术通过传感器接收目标物反射或发射的电磁波信息，遥感图像会因电磁波能量差异产生不同的色调和亮度，根据影像的色调、亮度以及图斑的形状、大小、位

置、阴影等特点，可以对遥感影像进行分析和解译。

凡是温度高于绝对温度 0K（－273℃）的物体都发射电磁波。产生电磁波的方式有能级跃迁（即“发光”）、热辐射以及电磁振荡等。电磁波有很多类型，其波长、频率也不一样，从波长最短的宇宙射线开始，依次有 γ 射线、X 射线、紫外线、可见光、红外线、微波、无线电波和低频电波等，组成一个连续的电磁波谱（图 9.2）。虽然各波段有不同的名称，但在两个光谱之间没有明显的界限，而且对波段的划分方法也不尽相同。目前遥感技术所能够利用的主要限于紫外线、可见光、红外线和微波的某些波段。

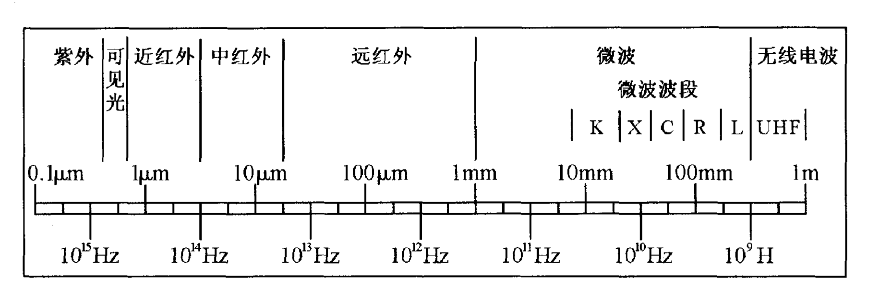


图 9.2　太阳辐射的电磁波谱

9.2.2　电磁波辐射源

电磁波的辐射源分为人工辐射源和天然辐射源两种。在自然界中，最大的天然辐射源是太阳和地球，太阳辐射是遥感中最重要的自然辐射源。地球上的一切物体，都能够同时反射和发射电磁波，地面物体反射的电磁波主要来自太阳，物体本身发射的电磁波也与太阳辐射有关，都是电磁波的辐射源。由于地球表面的温度远低于太阳表面的温度，因此两者的辐射特征截然不同。太阳辐射的是波长较短的电磁波，地球辐射的是波长较长的电磁波。所以，地面物体的电磁波辐射信息包括两部分，一部分是反射信息，它只能在白天接收；另一部分是发射信息，它既能在白天接收，也能在夜间接收。

太阳辐射光谱的组成非常复杂，在进入大气层之前是一条连续光谱（图 9.3）。太阳辐射能量的峰值位于波长 0.47 微米的青蓝光波段，主要辐射能量集中在紫外至中红外波段，其中可见光波段最强。当太阳辐射穿过大气层时，会受到各种气体分子、水滴、冰晶和尘埃等的干

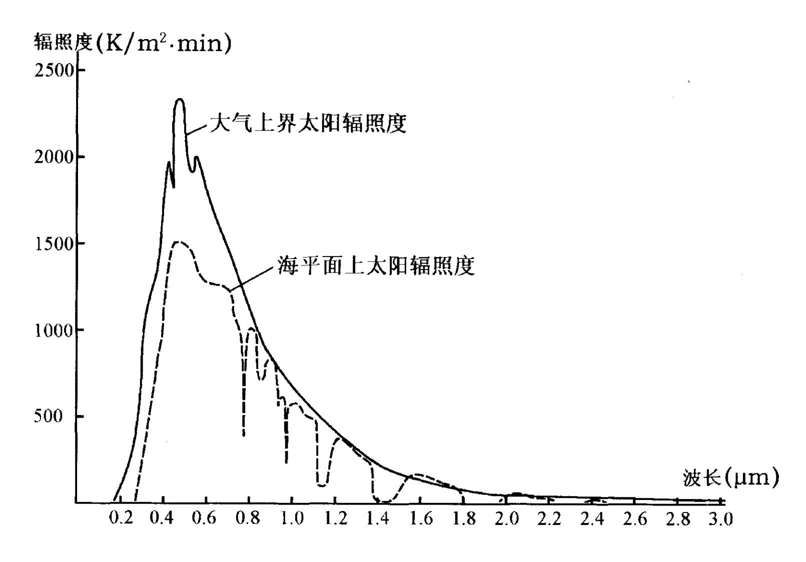


图 9.3 太阳辐射的电磁波谱

扰,产生反射、吸收和散射,太阳辐射的连续光谱发生了很大变化,有些光谱波段被部分或全部吸收,形成一些不同波段的吸收带(图 9.3)。

9.2.3 大气窗口

电磁波通过大气层时,损失了很大一部分能量。卫星遥感的传感器位于大气层之外,被大气层反射、吸收和散射的电磁波能量不但不能对地面成像,反而会影响传感器的成像质量,在设计传感器的时候必须予以考虑。通常把电磁波通过大气层时未被反射、吸收和散射的那些透射能力很强的波段范围称为大气窗口(如图 9.4),是遥感技术经常使用的电磁波波段。

从图 9.4 中可以看出,大致可以分为以下几个大气窗口:

1. 可摄影窗口(0.32 ~ 1.3 微米):其中包括紫外波段(0.32 ~ 0.38微米),可见光波段(0.4 ~ 0.76 微米),近红外波段(0.76 ~ 1.3 微米)。这个窗口属于反射地物光谱,对电磁波的透射率达到 90% 以上。在日照条件好的情况下,既可以用于摄影成像,也能够进行扫描成像。

2. 中红外窗口(1.3 ~ 2.5 微米):属于中红外波段反射光谱的范围,不能用于摄影成像,只能通过扫描成像方式来记录地物的电磁波信息,但目前使用较少。

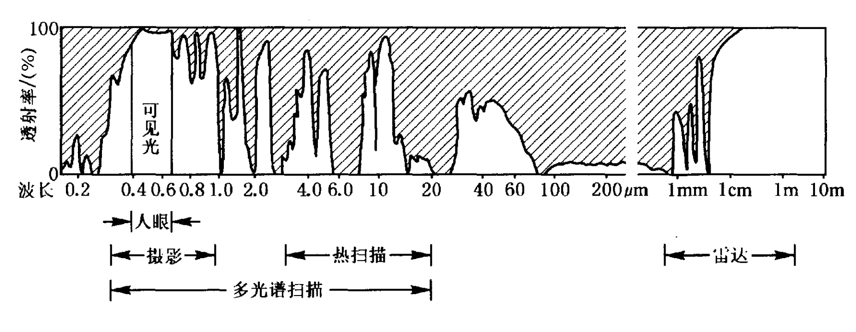


图 9.4 大气窗口分布示意图

3. 中红外窗口(3.5 ~4.2 微米):属于中红外波段前段,可以是地物反射光谱,也可以是地物发射光谱,属于混合光谱范围。中红外窗口使用较少,只能通过扫描方式成像。

4. 远红外窗口(8 ~ 14 微米):属于地物热辐射光谱的远红外波段,窗口的透射率为 60% ~70% 。该窗口是地物在常温下热辐射能量集中的波段,可以使用红外扫描仪昼夜成像,能够有效探测常温下地物的热辐射能量。

5. 微波窗口(0.8 ~25 厘米):处于微波波段,属于发射光谱范围,不受大气干扰,透射率可以达到 100% ,可实现全天候遥感探测。通常,微波传感器的工作波段为 0.8 厘米、3 厘米、5 厘米和 10 厘米。

9.2.4 地物光谱特性

自然界中所有的物体都具有反射和发射电磁波的能力。不同的物体由于其表面特征及内部组成情况不同,或同一物体在不同环境条件下,由于入射辐射能量不同,它们就具有不同的反射、发射、透射电磁波特性,即地物光谱特性。地物光谱特性是遥感技术的主要理论依据,决定了传感器工作波段的选择,也是遥感数据正确分析和判读的理论基础,还可以作为计算机数字图像处理和分类的参考标准。

地物在同一时间、空间条件下,其发射、反射、吸收和透射电磁波的特性是波长的函数。通常以横坐标代表波长,以纵坐标代表地物的光谱反射率或光谱亮度系数作出的相关曲线,即是地物的反射光谱曲线(如图 9.5)。

地球的陆地上大多覆盖着各种植被,遥感技术中充分考虑了对植

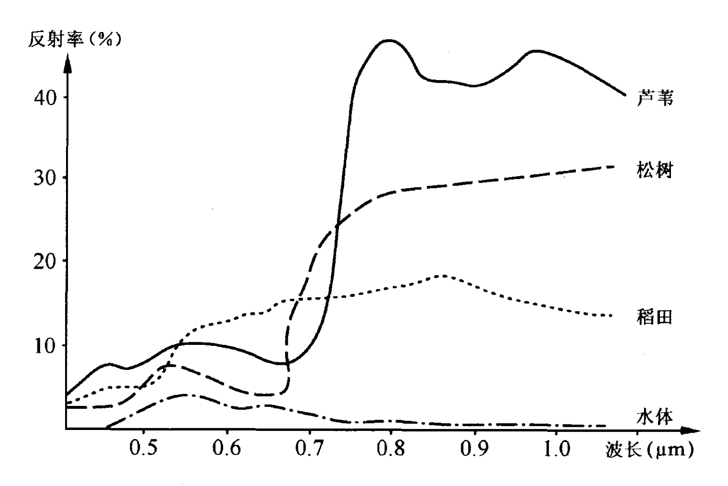


图 9.5 芦苇、松树、稻田和水体的反射光谱曲线

被光谱特征的研究和应用。不同植被的光谱特征比较接近,植物体内的叶绿素对紫蓝光和红橙光有两个吸收谷,植物体内的水分对中红外部分也有两个吸收谷,植物叶片对近红外波段有高反射区域(如图9.5)。为此,很多多光谱传感器都是避开了植物反射光谱中的几个吸收谷,接收蓝、绿、红与近红外波段的信息,乃至中红外波段的两个高反射波段的信息(如图9.6中的几个阴影区域)。

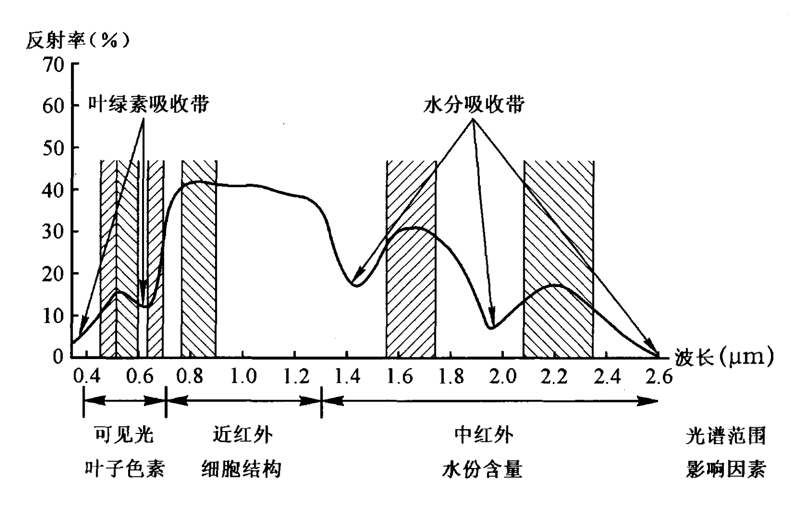


图 9.6 绿色植物的反射光谱曲线

9.3 遥感影像的分辨率

遥感影像为了适应不同行业的研究和应用要求,就需要具有相应的衡量指标。其中遥感影像分辨率是最重要的指标,包括空间分辨率、时间分辨率、光谱分辨率和温度分辨率。使用遥感影像对遗迹进行空间定位时,需要使用高空间分辨率的影像;对重要遗址进行动态监测中,要求影像具有高时间分辨率;研究重要遗址的遗迹、岩石和土壤等类型,分析其存在状况和动态变化,应该使用高光谱分辨率的影像;区分研究区域中植被、林木覆盖类型,监测有关的热特征等时,可以应用高温度分辨率的遥感影像。

9.3.1 空间分辨率

遥感影像的空间分辨率是用来表征影像能够分辨地面目标细节的能力。模拟影像是用单位距离内能够分辨的线宽或间隔相等的平行细线的条数来确定,单位为线/毫米或线对/毫米。

数字影像的空间分辨率通常用地面分辨率和影像分辨率来表示。地面分辨率是影像最小单元(像素)对应的地面尺寸大小,其大小由传感器系统的分辨率与传感器工作时的比例尺来决定。一种遥感影像的地面分辨率是固定数值。

影像分辨率是地面分辨率在一定比例尺影像上的反映,随影像比例尺的不同而变化。例如 10 米地面分辨率的全色 SPOT 影像在 1∶10 万影像上的影像分辨率是 0.1 毫米,在 1∶1 万影像上的影像分辨率是 1 毫米。

可见光传感器地面分辨率最高,热红外次之,微波波段最低。但是,在相同波长和孔径条件下,遥感平台的高度越高,地面分辨率越低。

9.3.2 光谱分辨率

遥感技术可以接收从紫外到微波部分的电磁波信息,每个传感器都能够接收特定波长的电磁波信息。工作过程中需要将具有连续波长分布的电磁波分解为若干个波长区间(称为通道或波段)的数据分别接收。由多个波段构成的数据称为多波段数据或多光谱数据。

遥感影像的光谱分辨率指传感器所用的波段数、波长及波段宽度。

如中国资源卫星1号星多光谱CCD相机的波段数为4,波段范围分别为B1:0.45~0.52微米,B2:0.52~0.59微米,B3:0.63~0.69微米,B4:0.77~0.89微米;而成像光谱仪的波段数可达到几十甚至几百个波段,波段宽度可高达5~10纳米。一般来说,传感器的波段越多,波段宽度越窄,所包含的信息量越大。高光谱分辨率的影像在对地表植被和岩石的化学成分分析中具有极大的优越性。

对于很多研究来说,接收影像的波段越多,光谱分辨率越高,效果就会越好。但很多时候波段太多,接收到的信息量太大,反而不利于快速探测和识别地物。所以要根据目标的光谱特性和必需的地面分辨率来考虑波段数目。

9.3.3 时间分辨率

地球资源卫星一般都是太阳同步轨道卫星,在相同的时间通过地球表面的某一地区,以保证成像的最佳方位角和太阳高度角,使不同日期的成像能够保持相同的照射条件。传感器对同一目标区域进行重复探测时,相邻两次探测的时间间隔称为遥感影像的时间分辨率。中国资源卫星1号星的重复周期为16天,其备用星发射成功后形成双星观测,重复周期成为8天,提高了时间分辨率。

遥感影像的时间特征主要用于提取同一地区不同时间各影像之间的差别,可以用于对地物的变化进行监测,也能够为某些专题的精确分类提供附加信息。例如在重要遗址监测过程中,能够获取不同时间和季节的遥感影像,分析植被、土壤、水体等的变化特征,制订或调整遗址整体保护的方案。

9.3.4 温度分辨率

温度分辨率是指热红外传感器分辨地表热辐射(温度)最小差异的能力,它与探测器的响应率和传感器系统内的噪声有直接关系,一般为等效噪声温度的2~6倍。为了获得较好的温度分辨率,红外系统的噪声等效温度应限制在0.1~0.5K之间,从而使系统的温度分辨率达到0.2~3.0K。目前,TM6图像的温度分辨率可达到0.5K。

9.4 常见卫星成像系统

现在有很多国家发射了大量的遥感卫星,对地球气候、能源、环境、资源等进行全面探查。考古研究中可能会使用的卫星遥感数据一般为中、高分辨率影像,在此对几种卫星上携带的主要传感器作一简单介绍。

9.4.1 美国 Landsat(陆地卫星)系列

1969 年以后,美国在统一的"地球资源勘测计划"支持下,逐步实施了"地球资源技术卫星(ERTS)系列"、"天空试验室(Skylab)"和"航天飞机(Space Shuttle)"等项目。1972 年 7 月 23 日,美国国家航空与宇宙航行局(NASA)成功发射了地球资源技术卫星一号(ERTS-1),这是专门设计来收集地球资源数据的第一颗不载人卫星。主要传感器是多光谱扫描仪(MSS,Multispectral Scanner),地面分辨率约为 79 米,影像幅面是 185 公里 ×185 公里。

在 ERTS-2 于 1975 年 1 月 22 日发射之前,NASA 将 ERTS 计划改名为"陆地卫星"计划(以区别于海洋卫星计划)。1982 年 7 月 16 日和 1984 年 3 月 1 日,装备了第二代传感器——专题制图仪(TM,Thematic Mapper)的陆地卫星 4 号、5 号相继发射升空,进入正常工作。

专题制图仪的波段参数是 TM1:0.45 ~ 0.52 微米,TM2:0.52 ~ 0.60 微米,TM3:0.63 ~ 0.69 微米,TM4:0.76 ~ 0.90 微米,TM5:1.55 ~ 1.75 微米,TM6:10.4 ~ 12.5 微米,TM7:2.08 ~ 2.35 微米。TM1 ~ 5 和 TM7 的地面分辨率为 30 米 ×30 米,热红外波段 TM6 的地面分辨率为 120 米 ×120 米,幅宽 185 公里。TM 的波段设置与植被等多种地物光谱特征的关系极为密切,所接收的影像能够很好地反映各种地物的特性。

1993 年 10 月 5 日 Landsat6 发射没有成功。1999 年 4 月 15 日 Landsat7 发射成功,设计寿命 6 年,是 NASA"地球使命计划"中的一部分,也是自 1972 年以来实施的 Landsat 计划中最后一颗卫星。该卫星携带了 ETM+,即增强的专题制图仪(Enhanced Thematic Mapper Plus)。

ETM+ 的 1 ~ 5 和 7 波段仍然保持 30 米 ×30 米的地面分辨率,热

红外波段提高到 60 米 ×60 米。增加了 15 米 ×15 米地面分辨率的全色波段(0.50 ~0.90 微米)。同一地点的重复访问周期为 16 天。

9.4.2 法国 SPOT 卫星

1986 年 2 月 22 日法国空间中心在法属圭亚那航天发射中心成功发射了 SPOT-1 卫星,由于 SPOT-1 轨道比陆地卫星要低,而且装备了推刷式扫描、电荷耦合器件成像的可见光高分辨率扫描仪,可获得全色影像 10 米、多光谱影像 20 米地面分辨率的数据,并可实现对地面的立体覆盖,从而开创了卫星遥感技术及其应用的新纪元。SPOT-1 采用高度 830 公里、倾角 98.7°的太阳同步准回归轨道。过赤道地方时间为 10:30,回归天数(重复周期)26 天。采用倾斜观测技术,4 ~5 天时间可对同一地区进行重复观测。

2001 年 SPOT-5 发射成功,全色波段(0.49 ~0.69 微米)的地面分辨率为 2.5 ~5 米,多光谱影像有蓝(0.43 ~0.47 微米)、绿(0.49 ~0.61微米)、红(0.61 ~0.68 微米)、近红外(0.78 ~0.89 微米)四个波段,地面分辨率为 10 米,幅宽 60 公里。

9.4.3 美国 IKONOS 卫星

IKONOS 卫星由美国太空图像(Space Imaging)公司研制,1999 年 9 月 24 日发射,是全球首颗商用高空间分辨率地球观测卫星,2000 年 1 月开始正式投入使用。IKONOS 卫星轨道高度 681 公里,倾角 98.2°,采用太阳同步轨道。卫星自北向南对地观测,98 分钟绕地球一圈,对同一地点拍摄的重复周期为 4 天。

IKONOS 卫星所接收的全色影像即黑白图像(0.45 ~0.90 微米)的地面分辨率为 1 米。多光谱影像的地面分辨率为 4 米,包括了蓝(0.45 ~0.53 微米)、绿(0.52 ~0.61 微米)、红(0.64 ~0.72 微米)和近红外(0.77 ~0.88 微米)等四个波段。

IKONOS 卫星的全景影像幅面为 11 公里 ×11 公里,实际影像的大小可以根据用户的要求拼接和调整。影像已被广泛地应用在政府、商业活动及学术研究等方面,如地图绘制、道路规划、土地利用、自然资源管理、森林监测、土地评估等领域。

9.4.4 美国 QuickBird(快鸟)卫星

2001 年 10 月 18 日,QuickBird 卫星由美国数字地球公司射入了轨道。重量约 1029 公斤,采用太阳同步轨道,轨道高度为 450 公里,轨道倾角 98°。绕地一周需 93.4 分钟,轨道重复周期为 1 ~ 3.5 天(因不同纬度各异),对地观测幅宽 16.5 公里。

QuickBird 影像全色波段(0.45 ~ 0.9 微米)星下点的地面分辨率为 0.61 米,多光谱影像有蓝(0.45 ~ 0.52 微米)、绿(0.52 ~ 0.60 微米)、红(0.63 ~ 0.69 微米)、近红外(0.76 ~ 0.90 微米)四个波段,地面分辨率为 2.44 米。

QuickBird 影像具有最佳的地面分辨率,在考古研究中应用广泛,可以对考古遗址进行监测、成图、勘探、展示等工作。图 9.7 为汉魏洛阳城南部的局部 QuickBird 影像,三个可见光波段合成彩色影像后与全色波段进行融合,得到 0.6 米地面分辨率的彩色影像。影像不但显示出地表情况,还清晰显示出洛河故道的痕迹。



图 9.7 快鸟卫星影像显示的河道与古河道

9.4.5 COSMO-SkyMed 高分辨率雷达卫星

COSMO-SkyMed 是意大利航天局和意大利国防部共同研发的高分辨率雷达卫星星座，共有四颗 X 波段合成孔径雷达（SAR）卫星组成。2007 年 6 月 8 日，COSMO-SkyMed 1 卫星发射升空，采用近极地太阳同步轨道，倾角 97.86°，轨道高度 619.6 公里，单星重复周期为 16 天。整个卫星星座的发射任务将于 2009 年年底前完成。

COSMO-SkyMed 雷达卫星的分辨率为 1 米，扫描带宽为 10 公里，具有雷达干涉测量地形的能力。COSMO-SkyMed 系统是一个可服务于民间、公共机构、军事和商业的两用对地观测系统，其目的是提供民防（环境风险管理）、战略用途（防务与国家安全）、科学及商业用途。

高分辨率雷达卫星数据应该具有较好的成像质量和一定的地表穿透能力，对地下考古遗迹的勘察应该会有一定的帮助。

9.4.6 中巴地球资源卫星

1987 年，中国、巴西两国联合研制地球资源一号卫星，1999 年 10 月 14 日资源一号 01 星发射，属于第一代传输型地球资源卫星，采用圆形太阳同步轨道，轨道高度 778 公里，轨道重复周期为 26 天。卫星携有不同空间分辨率的三种遥感器：CCD 高分辨率相机、红外多光谱扫描仪、宽视场成像仪等。

资源一号 01 星携带的高分辨率 CCD 相机地面分辨率为 20 米（星下点），分全色波段（0.51 ~ 0.73 微米）及蓝（0.45 ~ 0.52 微米）、绿（0.52 ~ 0.59 微米）、红（0.63 ~ 0.69 微米）、近红外（0.77 ~ 0.89 微米）四个多光谱波段，幅宽 113 公里。

2003 年 10 月 21 日，资源一号 02 星发射成功，传感器系统没有作大的改变，主要对 CCD 相机、红外扫描仪和宽视场成像仪在原有基础上弥补缺陷，以提高有效性和可靠性。资源一号 02 星发射后，与 01 星同时在轨工作，重复观测周期缩短为 13 天。

2007 年 9 月 19 日，资源一号 02B 星在太原卫星发射中心发射成功。卫星重量 1452 公斤，轨道高度 778 公里，倾角为 98.5°。星上有效载荷保留了资源一号 02 星上的全色和 4 谱段 20 米分辨率的 CCD 相机等传感器，同时增加了全色波段（0.50 ~ 0.80 微米）的高分辨率相机，地面分辨率为 2.36 米，幅宽 27 公里，重复观测周期为 104 天，扩大

了资源一号卫星数据的使用领域。

9.4.7 对地观测商用小卫星

根据卫星的重量划分,一般将1000公斤以下的卫星称为小卫星。其中,500~1000公斤称为小卫星,100~500公斤的称为超小卫星,10~100公斤的称为微型卫星,1~10公斤的称为纳米卫星,0.1~1公斤的称为皮卫星,小于0.1公斤的称为飞卫星。

小卫星由于重量和体积大大减小,研制周期缩短,成本大幅下降,随着传感器的发展,探测技术相当先进,覆盖几百公里的宽度,相当于过去的大侦察卫星,而重量却只有200~300公斤,寿命可达5年。因此,世界上已经有十多个国家涉足小卫星研制领域,美国、俄罗斯、法国、英国、意大利都有了自己的小卫星平台或星座。

2005年10月27日在俄罗斯普列谢斯克(Plesetsk)卫星发射场成功发射了北京一号小卫星,为国内外遥感应用用户提供了大量多光谱和全色遥感影像产品。该卫星设计在轨寿命5年,卫星重量约166.4公斤,近地轨道686公里。全色波段(0.50~0.80微米)传感器的地面分辨率为4米,幅宽24.2公里。多光谱传感器有绿(0.52~0.60微米)、红(0.63~0.69微米)、近红外(0.77~0.90微米)三个波段,地面分辨率32米,幅宽600公里。

9.5 遥感影像的处理

传感器收集研究区域的电磁波信息,经不同形式记录在感光胶片或磁带上,或者通过天线发送到地面卫星接收站记录下来。由于遥感信息的数据量很大,很难在卫星过境的短时间内将获得的数据全部传输到地面,因此信息传输前要进行数据压缩。地面卫星接收站接收数据之后需进行一系列的处理,然后再作合理的解译和分析。

把由传感器接收的原始遥感信息作适当的技术加工,制作成为有一定精度和质量的影像,以及从中提取有用信息的过程,称之为遥感影像处理,包括数据预处理、数据校正和影像处理等几种方式。

9.5.1 遥感数据的预处理

传感器接收的遥感信息受传感器性能、飞行条件、环境等因素的影

响,使用前要进行多方面的预处理,才能获得研究区域的真实信息。遥感信息预处理主要包括数据转换、数据压缩和数据校正,然后才能提供给用户使用。

9.5.1.1　数据转换

由于遥感数据记录形式与数据处理系统的输入和输出形式不同,用户要求也可能不一样,所以需要进行数据转换,在数据处理过程中也存在数据转换的问题。数据转换的形式与方法有模数转换、数模转换、格式转换等。

9.5.2.2　数据压缩

遥感影像数据的数据量十分庞大,影响了计算机数据处理的速度。所以在影像预处理过程中,需同时进行数据压缩,去除无用的或多余的数据,并以特征值和参数的形式保存有用数据。

9.5.2　数据校正

传感器成像过程中,由于环境变化、仪器自身精度和飞行姿态等因素的影响,接收的数据会产生一系列的误差。为了保证所获信息的可靠性,必须对存在误差的数据进行辐射校正和几何校正。

9.5.2.1　辐射校正

遥感过程中传感器接收到的信息是一个综合辐射量,包括遥感研究所需的目标本身发射的能量和反射的太阳能,以及周围环境如大气发射与散射能量、背景照射能量,等等。因此需要对辐射量进行校正,其中包括对整个图像进行补偿或根据像点的位置进行逐点校正两种方式。

9.5.2.2　几何校正

遥感成像过程中,由于飞行器姿态不稳定与轨道变化所产生的误差、地形高差引起的投影差和地形产生的阴影、地球曲率产生的影像歪斜、传感器内部因素引起的影像线性和非线性畸变所造成的误差等,使影像存在复杂的几何变形。为了从遥感影像上得出地面目标的正确地理位置,使不同波段影像或不同时期、不同传感器获得的影像相互配准,必须对影像进行几何校正,改正各种因素引起的几何误差。

9.5.3　遥感影像的处理

遥感影像处理包括遥感影像的几何处理、灰度处理和特征提取等。

用户选购的遥感影像，虽然经过地面卫星接收站的处理，但仍存在一定的几何误差和辐射误差，需要用户根据精度要求对其作进一步地处理，从中提取专题信息。

几何处理依照不同传感器的成像原理有所不同，对于无立体重叠的影像主要是几何纠正和形成地学编码。对于有立体重叠的卫星影像，还要解求地面目标的三维坐标和建立数字高程模型(DEM)。几何处理分为星地直接解和地星反求解。星地直接解是依据卫星轨道参数和传感器姿态参数空对地直接求解。地星反求解是依据地面若干控制点的三维坐标反求变换参数，有各种近似和严格解法。利用求出的变换参数和相应的成像方程，便可求出影像上目标点的地面坐标。

影像的灰度处理包括影像复原和影像增强、影像重采样、灰度均衡、影像滤波。影像增强包括反差增强、边缘增强、滤波增强和彩色增强。不同传感器、不同分辨率、不同时期的数据，可以通过数据融合的方法获得更高质量的影像。

特征提取是从原始影像上通过各种数学工具和算子提取用户有用的特征，如结构特征、边缘特征、纹理特征、阴影特征等。

遥感影像处理过程中不会增加新的信息，但是可以提高遥感影像的质量，使很多信息易于识别和判读，以便进行深入地分析和研究。

9.6 遥感影像的解译

遥感影像中记录着大量的地面信息，为很多领域的遥感探测与信息提取提供了重要的资料。遥感技术应用的重要环节是运用人工或计算机自动、半自动方法，判别遥感影像中与专题研究相关的人工地物和自然地物。

遥感影像解译以对影像要素或特征的分析和理解为基础，基本上可分为人工目视解译和计算机自动解译两种方法。

9.6.1 目视解译

目视解译就是借助立体镜、放大镜和光电仪器，通过肉眼来观察和分析遥感影像的基本方法，也称为目视判读。目视解译人员在掌握各种遥感影像特性的基础上，依据影像的解译标志，并根据专业工作的实践经验，对影像进行合理解译。影像的解译标志又分为直接解译标志

和间接解译标志。

9.6.1.1 直接解译标志与间接解译标志

直接解译标志是地物本身属性在影像上的直接表现，如影像的形状、大小、色调、色彩、阴影、图案、布局、纹理和位置等。它反映物体所固有的一些特征，根据这些特征可以直接从影像上辨认出相应的地面物体。

间接解译标志是通过一些与解译对象有密切联系的现象或地物在影像上反映出来的特征，进行分析、研究、推理、判断，从而识别解译对象的属性。如某一岩性或构造可以通过地貌形态、水系格局、植被分布和土地利用、人类活动等影像特征间接地表现出来。

9.6.1.2 目视解译的原则

目视解译的一般原则是首先纵观全局，把握整体，然后分析研究细节，从已知到未知，将熟悉地物的影像特征作为解译标志，逐步解译其他类似的未知影像。同时深入分析已知地物的影像特征和未知地物影像之间的相互关系，特别是和未知物体影像之间的相关位置，确定未知物体的属性。

此外，目视解译还必须遵循先易后难、先清楚后模糊、先山区后平原、先地表后隐伏、先整体后局部、先宏观后微观的解译原则。从影像的客观实际出发，参考已知资料，必要的时候进行实地踏查，积累一定的经验之后才能够进行正确的解译。同时不能局限于已知资料，生搬硬套。

9.6.1.3 目视解译的方法

遥感影像的解译方法可以归纳为以下几种。

直判法：对于影像上比较明显、清楚的地物，可利用直接解译标志确定地物的属性。如河流、山峰、房屋、树木等都可以通过直判法解译。

对比法：将需要解译的影像与已知解译标志进行对比，或与典型调绘样片进行比较，以确定地物的属性。运用对比法进行解译的影像与参考影像必须具有相同的影像种类、成像条件、季相条件等。

邻比法：在解译比较困难的域区，解译标志差异性不明显，而且细节比较模糊时，可以与相邻区域加以比较，以判别出不同的地物，解译那些难以辨认的图斑。

历史比较法：利用同一地区不同时间重复接收的影像加以对比分析，了解地物的变化情况和发展速度。这种方法尤其适合于对地物动

态变化的研究。

逻辑推理法：利用各种地物或现象之间的内在联系，利用间接解译标志，按照逻辑推理的方法判读地物的属性。

具体解译过程中，经常需要同时使用几种解译方法。例如解译水系中的水流方向时，可以根据很多因素进行分析：支流汇入主流处成锐角相交，锐角指向下游；河曲段的迂回扇，其收敛角的一端指向上游；河滩、堤坝、桥墩下边，因水流冲击所激起的浪花、泡沫呈白色的舌状物，指向下游；停泊的船只，船尾指向下游；破冰船的方向与水流方向相反；岸边小水湾的方向与流向相反，湾口朝向下游；河流中沙滩、边滩，多呈锯齿状，锯齿指向下游；放木的河流，木材与河岸成锐角，锐角指向上游。

9.6.2 计算机自动解译

计算机自动解译是运用计算机软件，在一定算法和法则的支持下，依据影像解译标志，对遥感影像进行自动解译，达到对地物属性进行识别和分类的目的。遥感影像的自动识别是利用计算机技术，依据影像信息特征，对影像的内容进行分析和判别，掌握影像中各种线条、轮廓、色调、图案、纹理等所对应的地物属性与状态。影像识别的本质是分类，将影像合理分类之后，便可以参照地面类型对影像进行识别。常用的分类方法有监督法分类和非监督法分类，很多遥感影像处理软件都具备这些功能。

计算机自动解译技术的主要优点是速度快，能方便而准确地测算出各种地物类型的分布面积，适合于快速环境变化和动态监测方面的研究。但是，现在计算机解译的类别往往不如目视解译详细，目视解译在利用和综合影像特征方面的能力远远高于计算机，计算机自动解译的成果仍需要专业人员进行目视鉴定，然后再加以调整和修改。

9.7 勘探地球物理学

勘探地球物理学（或称应用地球物理学，简称物探）是在地球物理学的理论基础上，研究矿产资源与周围介质在弹性、磁性、电性、密度、放射性、导热性等物理性质方面的差别，并依据这些物性差别，研究探测这些资源的合适物理方法的一门地球物理分支学科。地壳中岩矿或

目标物与地层之间的物性差异,是进行物探工作的地球物理学的前提条件。不同的物性差异或物性参数(如磁异常、电异常等),可以通过相应的仪器设备进行观测、记录,然后对相应的勘测数据进行特殊的处理和分析。目前在地面上进行的物探方法大致有重力勘探、磁法勘探、电法勘探、放射性勘探、地热测量、地震勘探、地质雷达等七种,但是相对于矿产资源等方面的勘探,考古遗迹的勘探属于极其微观的应用,比较适合中国夯土一类考古遗迹的方法一般有磁法勘探和电法勘探,对于砖石、空洞等结构的考古遗迹,也可以使用地质雷达进行勘探。

9.7.1 电法勘探

考古遗址的电法勘探,是运用电阻率探测仪器,探测考古遗迹或现象与周围地层之间电性差异,来分析考古遗迹或现象的分布范围和几何形状等属性。电法勘探利用的参数多,考古勘探中应用最多的是电阻率法。

电阻率勘探的物理学前提是,考古遗迹或现象与周围地层之间存在着导电性能的差异,也就是说构成考古遗迹的文化层、夯土、填土、红烧土、砖石等的电阻率各不相同,从而使相应地层中的电阻率具有一定的差异。野外工作中,一般是首先在地面上选择一条直线,并沿该直线在每隔一定距离(如 1 米、0.5 米等)的测点上,探测出一定间隔的两电极之间的电阻率,然后绘制出测点在这一方向上电阻率变化的曲线。最后依据这样的曲线分析地下遗迹的情况。实际工作中往往在一定的矩形范围内,布设测点矩阵,然后逐点探测,最后在计算机中生成探测范围内电阻率异常的三维图形,直观地反映出电阻率异常情况,便于考古学的分析和解译。

9.7.2 磁法勘探

考古磁法勘探是运用磁力仪等设备,观测和分析考古遗迹或现象与周围地层之间的磁性差异和磁场特征,由此来研究考古遗迹或现象的分布特征。

地理磁场覆盖着地球上的任何角落,使各地都具有一定的磁场强度,也使原生地层在生成过程中产生一定的磁化现象而具有磁性。此外,地层中的其他磁性物体在其周围都会形成一个磁场,这些磁场叠加于正常的地磁场之上,引起正常地磁场发生或大或小的异常,这种磁异

常就是磁法勘探所要研究的对象。野外磁法勘探就是使用仪器测定地磁场总强度或垂直分量,再经数学计算去掉正常地磁场值,获得磁法勘探所需要的磁异常数值,最后绘制并解译磁异常折线图、等值线图、三维异常图,等等。

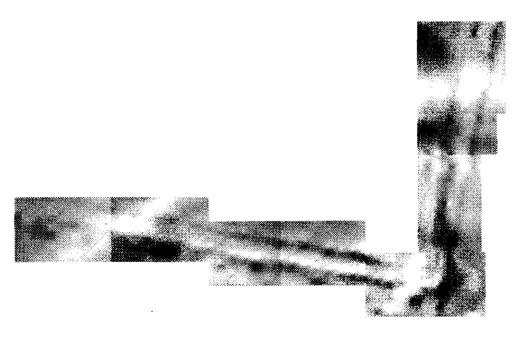


图 9.8　洹北商城东南角磁法勘探图

考古遗址中许多经过焙烧的物质,如红烧土、砖瓦、灶坑、窑床、铸范等,在高温焙烧过程中会失去磁性,冷却时在地磁场的作用下受到磁化而具有一定的热剩磁,为考古磁法勘探提供依据。

埋藏在地下的古城垣、夯土台基、古河道等遗迹,由于扰动了原地层的磁场而产生了磁场异常现象。图 9.8 为洹北商城东南角的磁法勘探结果图,高磁强异常值的连线清晰地显示出城墙两侧的走向,这是由于城墙墙体内的磁强值比较一致,墙体之外的磁强值是另外一个数值,城墙两侧是磁强数值变化的地方,所以磁强异常值最大。

洹北商城的城墙埋藏在地面以下 2.5 米左右,而且墙体保存情况很差,但是在磁法勘探结果图中可以清晰地显示出来,由此可见磁法勘探的效果非常显著。磁法勘探的点阵间隔可以定为 0.5 米甚至更小的数值,能够对建筑基址或墓葬等考古遗迹进行高分辨率的勘探,近年来国内学者在众多考古遗址上的磁法勘探,都取得了令人满意的效果,可望在考古勘探中发挥更大的作用。

9.7.3　地质雷达

地质雷达是通过一个传感器向地下发射一定波长的脉冲电磁波,经过地层界面或目标物反射之后,反射回来的脉冲电磁波被另外一个传感器接收,记录反射波的强度和旅行时(又叫走时),通过雷达图形来显示地层或目标所在的位置和分布特征。

地质雷达一般都配备几组不同波长的天线,以便针对不同的考古遗迹进行勘探,有的地质雷达还配备了屏蔽装置,基本上消除地上电

线、树木等的干扰，提高了勘探的效果。地质雷达在高频段的勘探精度可以达到0.3米以内，但是随着勘探精度的提高，探测深度会逐渐降低。田野勘探时，可以将地质雷达在考古遗址内沿地表直线拖动，每组探测数据通过专门软件处理后可生成一幅剖面图，多组平行的剖面图甚至还可以生成探测区域内的三维雷达图形，使进一步的分析和解译变得十分便捷。

具有屏蔽装置的地质雷达非常适合于对砖石结构或具有空洞的墓葬、建筑基址、城墙等考古遗迹的勘探，夯土遗迹在雷达图像往往上也会产生明显的反映。只是地质雷达的价格比较昂贵，重量较大，携带和使用不是很便利。

9.8 水下遥感考古

水下考古是对遗留在水下的古代人类文化遗迹进行调查、发掘和研究，水下考古可以看做是田野考古学在水下的延伸，涉及很多自然科学、工程技术等方面的手段和方法。它的首要任务就是开展水下调查发掘工作，为此发展和形成了一整套调查、发掘的技术和方法。现在，水下考古的对象从沉船、沉没物扩大到淹没于湖底、海底的港口和城市等遗址，手段和方法也大为改进，其中水下遥感考古是水下考古勘探的重要手段。

水下遥感考古的传感器系统由声纳、侧向扫描声纳、海底剖面仪、磁强计（图9.9）和全球定位系统等组成，主要用于探测水下的异常现象。传感器接收的全部数据，必须与准确的位置数据相对应，所以必须同时使用高精度的GPS系统随时对传感器系统进行定位。携带各种传感器的轮船在研究区域内作往返探测，轮船航迹渐次覆盖一个搜寻区域，最后对全部数据进行综合处理与分析，对异常区域进行判断与定位。

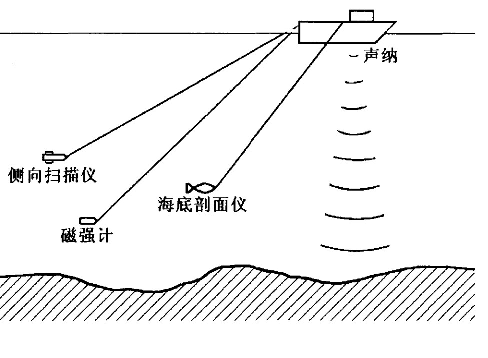


图9.9　水下遥感考古设备模型

9.8.1 声纳(Sound Navigation and Ranging,缩写为 Sonar)

被动声纳是监听潜艇或轮船一类目标产生的声波;主动声纳则主动产生声波脉冲,监听脉冲遇到目标反射的回声。一个简单的声纳——回声探测器或回音探测仪,能够根据脉冲从发射至海底的往返时间,计算出水的深度。声波在水下的传播速度,依赖于水的温度、压力和含盐量。声纳发射器通常安装在轮船船体上,用于测定龙骨下的水深,当它垂直向下发射时,只能覆盖轮船航迹前后很窄的条带区域。

9.8.2 侧向扫描声纳(Side Scan Sonar)

侧向扫描声纳安装在轮船的侧面,使轮船航迹的两边有较大的扫描覆盖面积,声波能量通过仪器定向发出,每侧各有一束,非常适用于海上考古。声纳显示出脉冲从发射器发射到目标物并反射回来的时间,通过一支笔或绘图仪,一定强度的回声就流过电敏纸,在电敏纸上形成色调较深的标记。随着轮船向前移动,连续的扫描带组成一幅声纳影像。

9.8.3 海底剖面仪(Sub Bottom Profiler)

海底剖面仪提供有关海底材料与结构的信息。向海底垂直发射一束高能量的定向声波,就能获得海底基层有关深度、沙的密度、基层岩石、管线、失事船只残骸等信息。在浅水中操作时,仪器可安置在小船的船体上。所用声波的频率,对测距、清晰度和穿透深度都有很大的影响。

9.8.4 磁强计(Magnetometer)

质子进动磁强计可以用于对陆地和水下遗址进行探测。在陆地上,它能够发现铁器、烧烤结构、填平的壕沟与洼地,以及墙体、地基、道路、墓葬,等等。在水下,磁强测定法适用于探查铁制船只、大炮和炮弹,以及油罐等磁强异常的物体。

质子磁强计是一种测量地球磁场局部差异的设备,这些差异可能与存在的黑色金属有关,也可能与类似铁质矿砂高度集中的自然现象有关。

我国海域辽阔,海洋面积有300万平方公里,航海历史十分悠久,我国海域中历代沉船成为水下文化遗产的主要组成部分。十多年来,有关部门在渤海、黄海、东海、南海先后进行了多项水下沉船遗址的调查、发掘。如广东南海一号宋代沉船的调查与发掘,海南省文昌县宝陵港清代初期沉船调查,福建连江定海宋元、明清沉船遗址群的调查和发掘,辽宁绥中三道岗元代沉船调查与发掘,山东长岛文物普查,浙江宁波象山西泽宋元沉船遗址调查,西沙群岛水下文物抢救发掘等。这些水下考古工作都取得了丰硕的成果,也推动了水下遥感考古技术的发展与完善。

第十章　遥感考古研究

20 世纪初，欧美一些国家开始把航空摄影等遥感技术应用于考古工作中，最早的航空考古（Aerial Archaeology）照片，被认为是英国人沙普（Sharp）中尉于 1906 年从军用气球上拍摄的环状列石（Stone-henge）照片。在两次世界大战期间，英美等国考古学家从飞机和升空气球上拍摄了大量的考古遗址照片，并进行相应的研究。这些工作是运用考古遗迹的地面标志进行分析，为考古研究提供科学而合理的依据，引起考古界的高度重视。从此，航空摄影与其他方式的摄影技术，便成为考古技术的一个重要组成部分。

到了 20 世纪 60 年代，高速发展的空间科学和光电技术，推动了遥感技术的进步，遥感考古工作在发达国家也是发展迅速，手段与方法不断改进和完善。现在，很多国家将地面透射雷达、多光谱扫描仪、质子磁强计、电阻率探测仪等应用于考古工作。国内的一些单位开展了大量的遥感考古工作，取得了令人满意的成果。

遥感考古就是从航天飞机、卫星、飞机等不同空间位置上，运用摄影机、扫描仪、雷达等成像设备，获取考古遗址的影像资料，然后运用计算机图形图像处理技术，对这些影像进行增强和处理；同时，根据遗址范围内地表状况和光谱成像规律等的相互关系，对影像的色调、纹理、图案及其时空分布规律进行研究，判定遗迹或现象的位置、分布、形状、深度等特征，进行遗址探查、考古测量、古地貌和古遗址复原等工作，为考古研究提供重要线索。

遗迹或现象辐射电磁波能量，是遥感考古工作的前提。由于考古遗迹或现象与周围环境的差异，辐射电磁波的情况不一样，而电磁波波谱特征及其时间变化和空间分布规律，在遥感影像上表现为不同的影像色调和由不同色调组成的各种图案，并表现出一定的时空变化规律。所以遥感考古的工作原理，是建立在考古遗迹或现象的物理属性、电磁波波谱特征和影像特征三者的关系上；遥感影像的解译原理，是根据影

像的色调，图案及其分布规律，来判断遗迹或现象的波谱特征，从而确定遗迹或现象的属性。

10.1 考古遗迹的影像特征

在遥感考古工作中，通过遥感设备接收的资料记录了大量土壤学、地质学、地貌学、生态学和地理学等的信息，它们通过不同的方式，反映出考古遗迹或现象的特征。为此，必须掌握考古遗迹或现象的影像特征，才能对遥感影像进行正确的解译。

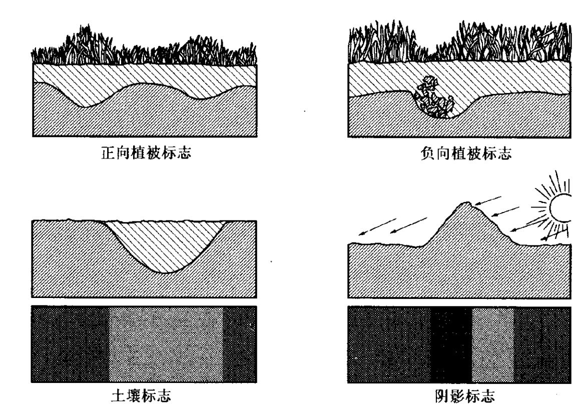


图 10.1 遥感影像的主要遗迹标志

遗迹或现象以各自的方式存在于自然环境中，形成独特的遗迹土壤标志、遗迹阴影标志与遗迹植被标志（图 10.1），构成考古遗迹最基本的影像特征。

10.1.1 遗迹土壤标志

在传统的考古钻探和发掘工作中，往往要根据遗迹土壤与周围土壤的差别来进行判断，这种土壤差别是由于遗址的路土、夯土、填土、淤土与自然土壤的色泽、结构、湿度、致密度等不一样而产生的。这种土壤差别在一些遥感影像上也能显示出来，因而被遥感考古工作者利用，作为遗迹的土壤标志，对地下考古遗迹或现象作出判断。

通常情况下，埋藏较浅的遗迹或现象在耕地中是很容易被发现的，尤其是耕土层翻犁过之后，其中所隐含的各种土壤差异更加明显。所以，这个时期拍摄的航空影像，能够清晰地反映出遗迹或现象的某些特征。在土壤色泽差异较小的地方，因为其致密度和含水量的不同，遗迹或现象仍然可以在热红外影像、雷达影像等遥感资料中显示出来，为考古遗迹的探查工作提供重要线索。在久旱少雨、土壤较为干燥的季节

里收集的遥感影像上，遗迹土壤标志显示得较为清晰，特别是在暴雨后再连续天晴三四天后，显示的效果最佳，能反映出较深地层中的遗迹情况，探测出通过地面标志无法辨认的墓葬、道路、城墙和古河道等遗迹。在新疆北庭古城的黑白和彩红外航空影像上，土壤标志显示出城内的夯土基址、护城河、道路等遗迹。其中的夯土基址、道路等在实地调查时很难发现，而在航片上却以浅色的线状影像特征表现出来，并且可以根据影像遗迹标志，绘出古城详细的布局图(图 10.4、彩图 1)。

10.1.2 遗迹阴影标志

残存于地面之上的遗迹总会呈现出一定的微地貌特征，在倾斜太阳光线的照射之下，其阴影的明暗、形状、大小和组合方式，清晰地反映出遗迹的特征。因此，在空中对这种遗址进行摄影，并对影像进行分析，就能判断出遗迹的残存状况、分布、范围，等等。在新疆高昌古城的黑白航空影像上，城墙、马面、城门以及城内残存的建筑物都有清晰的阴影与遗迹并存，黑白分明。由此可以判断出上述遗迹的准确位置和形状，并且还能判断出一些类似胡同的遗迹(图 10.2)。

遗迹阴影标志受航空摄影时太阳高度角的直接影响，并且与地表微地貌特征有关。对于地形起伏小，遗迹相对高度不超过两米而且相距较远的遗址，应该在较低太阳高度角情况下进行航空摄影，也就是说早晨或傍晚的航空摄影，能够获得较好的阴影标志；对于地形起伏较大的遗址，如果遗迹高低参差不齐，而且相互间的距离很近，则需要选择合适的摄影时间，最好是在正午前后进行航空拍摄，以避免较高地物的阴影遮挡了较低的遗迹或现象。如果条件许可，最好能够拍摄一天中不同时间的航空影像，以便于将不同方向的阴影进行比较，对遗迹情况做出正确的判断。

10.1.3 遗迹植被标志

地下埋藏的考古遗迹或现象往往会产生土壤的板结与疏松、肥沃与贫瘠、含水量多少等差异，从而会导致树木与灌木丛生长与分布情况发生异常，或者会使农作物与野草的高度、密度和色彩出现差异。这些差异在遥感影像上都有各自的表现特征，从而成为判断地下遗迹或现象的植被标志。

地下不同的遗迹或现象，对植被的生长情况有不同程度的影响。

在填平的壕沟、渠道一类的遗迹上，因为填土质地疏松，含水量比周围土壤丰富，也相对比较肥沃，所以会刺激植被的生长，从而显示出“正向”植被标志。然而，如果地表以下有夯土、瓦砾或古代道路一类遗迹时，土壤则比较贫瘠、板结，透水性能差，抑制了植被的生长，于是就会出现“负向”植被标志。例如，在汉魏古城的黑白航空影像上，谷水与洛河故道等遗迹色调较深，因为小麦长势好，比较密集，所以很容易从航片上区别出来。而汉长安城的航空影像上，因为建筑基址上的小麦长势较差而显示出较浅的色调，从而可判断出建筑基址的位置和形状（彩图2）。

一般情况下，草本植物显示出来的植被标志比较明显，而且在每一个植物的生长季节都会重复出现，其中谷类农作物产生这类标志的效果最佳。在农作物趋于成熟的季节里，产生植被标志的农作物与背景环境中的农作物因生长情况的差异，成熟时就会出现或早或晚的差异，因而更容易从航片上判别出来。其中在垂直摄影航片上，比较容易区别出植被生长密度差异的特征；而植被的生长高度与色彩差异等的植被标志，在低太阳高度角（早晨或傍晚）时倾斜摄影的航片上显示效果较好。

10.1.4 遥感考古的影像解译

现在遥感影像种类丰富，特别是卫星影像具有丰富的波谱特征，能够比较全面、准确、客观地反映出考古遗址范围内的很多有用信息。在地表土壤干燥而裸露的季节，地下的夯土基址、古河道等考古遗迹，能够在一些卫星影像上形成较为明显的遗迹标志，特别是中红外波段的卫星影像对地下遗迹有很好的反映效果，能够反映出地下遗迹的布局特征，适合于考古勘探方面的应用。

在遥感考古研究中，地下考古遗迹或现象因受地表情况的影响，影像解译的不确定性会更大。对于遥感影像上一定的色调和图案，对应的地面特征却由于存在同物异谱、异物同谱现象，解译结果往往不是唯一的。判读地下考古遗迹时需要分析影像上哪些异常图斑是由地面物体产生的，哪些是由地下考古遗迹产生的。但在实际研究中，不难发现地表的物体在卫星影像的各个波段上都会有一定的反射，而地下遗迹或其他现象则不然，它们往往在红外波段的影像上反射较强，而其他波段上的反射非常微弱甚至没有反射。

目视解译的方法是遥感考古影像识别的最基本方法，目视解译过

程中，首先要分析影像图斑的空间分布规律。古城遗址内建筑基址、道路等遗迹产生的图斑与古城的结构和布局有密切的关系，例如古城内的主要街道应该与城门相连通，护城壕一般与城墙并行等。其次，分析遥感影像的时间变化规律，由于考古遗址内的植被类型和土壤的含水量等随季节而变化，同一考古遗迹在不同季节的遥感影像上会产生不同的图斑，据此还可以作为选择遥感数据接收时间的标准。最后，分析遥感影像的相关信息，地下埋藏的考古遗迹，会对其周围的土壤和植被产生一定的影响，比如地下有城墙、道路一类的遗迹时，相应地域的土质比较干燥，植被长势一般较差，影像的色调较浅；而地下有护城壕、池沼一类的遗迹时，相应地域的土质则较为潮湿，植被长势往往较好，影像的色调较深。

总之，解译遥感考古影像时，需要掌握影像成像的季节、类型、处理方法、地面植被情况、考古遗迹的埋藏与分布特征等信息，然后才能对影像进行合理的分析与解译。同时需要在实地进行地面调查与钻探，对解译结果进行验证，去伪存真，保证研究结果的正确性。

10.2 新疆高昌古城遥感考古研究

高昌古城位于东经 89°32′，北纬 42°51′，海拔在 -48 米左右，地处吐鲁番盆地中部，北依火焰山，西距吐鲁番市约 50 公里。周围地理环境独特，物产丰富。这里气候干燥，但也不乏足够的水源用于耕种。在 1961 年国务院公布高昌古城为全国重点文物保护单位之前，当地居民在古城内的很多地方耕种农作物，使城内遗迹受到严重的破坏。再加上自然风蚀、水流等的破坏，高昌古城内绝大部分地域已见生土层，有的地域甚至侵蚀到当时地面之下一米左右，很多地方的遗迹早已荡然无存。古城内东部的大片地域被碎石覆盖，其他地域多为荒废的农田。城内植被稀少，没有村舍，只是在荒废的农田里生长了一些野草和灌木，遗迹位置几乎是全部裸露的不毛之地。

高昌古城的外城城墙保存较好，并且有较多的马面；内城的东墙全部被毁，北墙仅残存部分遗迹。内城的中间偏北位置，有一堡垒式建筑，俗称“可汗堡”。外城的北部中间有规模较大的建筑基址群，西南部有寺庙遗迹。寺庙遗迹的保存情况较好，可以大致分辨出布局特征。城内其他地方还有一些零星的遗迹。城外北面的阿斯塔那与哈喇和卓

分布有与古城相关的晋—唐时期墓葬群。

高昌古城内植被稀少,土壤干燥,现存的城墙等遗迹起伏较大,可利用遗迹的阴影标志和土壤标志进行分析。收集的影像有高昌古城1959年夏季拍摄的黑白航片资料,底片比例尺为1:6万,做成大约1:2万的航空影像图。但影像较为模糊,细节特征不明显。同时还收集了1984年7月14日的黑白航空影像,效果比较理想,由1:3.2万的底片放大成约为1:1.2万的黑白航空影像图(图10.2)。

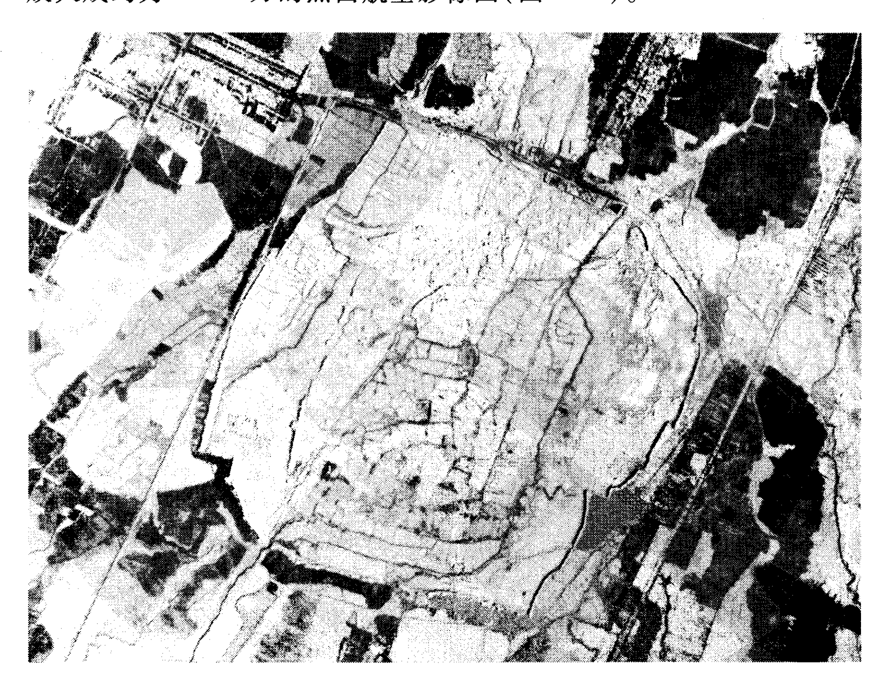


图10.2 高昌古城航空影像

高昌古城两种航片资料的拍摄时间均为夏季,这个季节城内干燥,遗迹的土壤与阴影标志较为明显,航片上高大的城墙、马面、瓮城与其阴影并存,黑白分明,非常清晰。根据航片解译与踏查结果,绘制出高昌古城的遗迹位置平面图(图10.3)。

高昌古城的东、南、西三面外城城墙与马面、城门可以根据航片上的特定影像特征勾画出来。五座城门具有形制不同的瓮城。沿外城北墙有不少居民建造的房屋,马面与城门无法判断,但可以确定城墙的位置。外城西南角的寺院遗迹比较清晰,能大致分辨出每个建筑基址的位置和形状。其周围建筑基址因保存情况较差而显得模糊,只能勾画出大概的

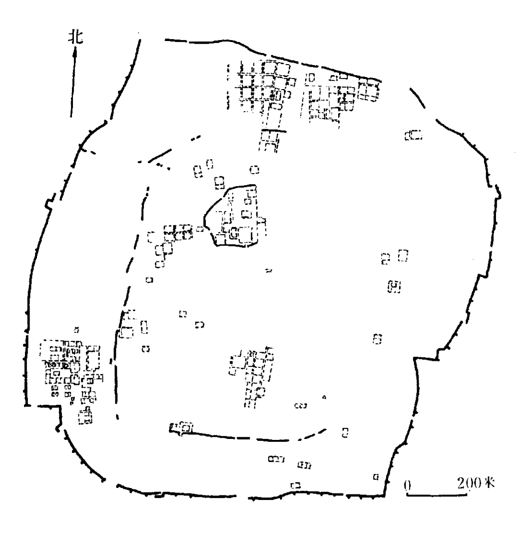


图 10.3　高昌古城航空影像解译图

轮廓。这一片建筑基址为庭院式结构,每个庭院外围可能是用房屋与围墙封闭起来,外有通道,形成几个相互独立的庭院。

外城北部偏西位置,能分辨出几条“胡同”似的遗迹,呈东西方向与南北方向交叉分布,邻近两条“胡同”之间相隔 45 ~ 50 米。实地踏查发现,这些“胡同”宽约 3 米,两边是房屋的墙基,而且边缘非常整齐。保存情况稍好的,中间可见低平的凹槽,两边有断断续续的高约 50 厘米的残墙遗迹;保存情况差的,凹槽不很明显,两边的残墙遗迹少而且低,但仍能看出上述趋势。实地踏查还发现,这一区域中的“胡同”直接由房屋的墙基整齐排列而成,不见有围墙残迹。

外城北部中央,建筑基址的地势很高,布局独特,最高处的建筑基址很大,位置大约在古城的南北中轴线上,可能是大宫殿一类的建筑基址。外城北部东段的遗迹保存情况很差,显得较为混乱,布局特征不明显。内城东墙与“可汗堡”东墙遗迹全无,航片上没有任何反映,内城北墙也仅能判断出零星的几段。内城南部现存的一片残迹,与“可汗堡”内部以及其他零星残迹一样,根据航片上的影像特征也无法分辨出遗迹的布局情况。

根据高昌古城航空影像上所反映的遗迹布局情况进行分析,可以发现城内不同区域建筑基址的布局差异很大,这可能是由于不同区域的建筑,因其建造时间的早晚与用途的不同而形成的。总之,高昌古城内绝大部分遗迹早已破坏殆尽,总体布局已无法通过航空影像的分析进行复原。

10.3　新疆北庭古城遥感考古研究

北庭古城位于东经 89°12′,北纬 44°06′,在吉木萨尔县城之北约 12

公里处，坐落在天山北麓坡前地带与准噶尔盆地古尔班通古特沙漠相接壤的平原上，海拔高度为640米左右。这里水源充沛，土地肥沃，发源于天山的长山沟在古城南约3公里处分为东、西坝河，古城位于东坝河西岸，西坝河在城外约800米处自南向北流过。当地居民沿外城南墙和西墙建造了不少房屋，外城西南部已被辟为农田，其他部分也因取土等原因，被挖得面目全非，遍地是大大小小的土堆和土坑，实地调查时除了内外城墙很难发现其他遗迹。在夏秋季节，城内低凹地段生长着一些灌木和野草。较高地段上土壤干燥，碱化严重，表面土壤细碎。

北庭古城现存内外两重，平面均呈不规则的南北向长方形。外城北面有低矮的羊马城，内城位于外城中部偏东北位置，内外城墙都有马面、敌台、角楼和城门，墙外有各自的护城壕，城内还有一些与护城壕相连通的沟渠。北庭古城内原有的建筑物破坏殆尽，仅残存几处墙基和建筑基址。

北庭古城的影像资料包括1959年夏季拍摄的黑白航空影像，摄影比例尺为1∶6万，做成大约1∶2万航空影像图（图10.4）。另外收集到1978年6月14日的黑白航拍资料，1∶3.2万底片放大成约为1∶1.2万黑白航空影像图，以及1986年9月6日拍摄的彩红外反转影像，摄影比例尺为1∶6万，做成1∶1万的彩红外反转影像图（彩图1）。



图10.4　北庭古城黑白航空影像图

北庭古城的三种航片都非常清晰，反映出古城内大量考古信息。在1959年拍摄的航片上，城内几乎无人居住，内、外城的城墙、马面、敌台及羊马城等极易分辨出来。只是外城的西部南段为农田，这里的遗迹已经全部被毁，无法判定。在1978年和1986年拍摄的航片上，可以发现当地居民沿外城南墙和西墙等处修建了不少房屋，这两面城墙因此受

到了严重破坏。航片上还能够发现城内修了公路，公路西侧全部被农田、村舍所占，从而破坏了这一地域中的遗迹。

在上述三种航片上，都能发现北庭古城内有纵横交错的浅色细线状影像特征，经过实地踏查，发现相应遗迹的土壤较紧密，具有层状结构，有的地方还具有某些类似内城城墙夯层的结构，初步可以确定为夯土墙基。护城壕及城内沟渠的影像色调较深，很容易分辨出来。彩红外影像上，植被呈红色，水体呈黑色，夯土墙基为浅白色，影像特征更易于辨认。

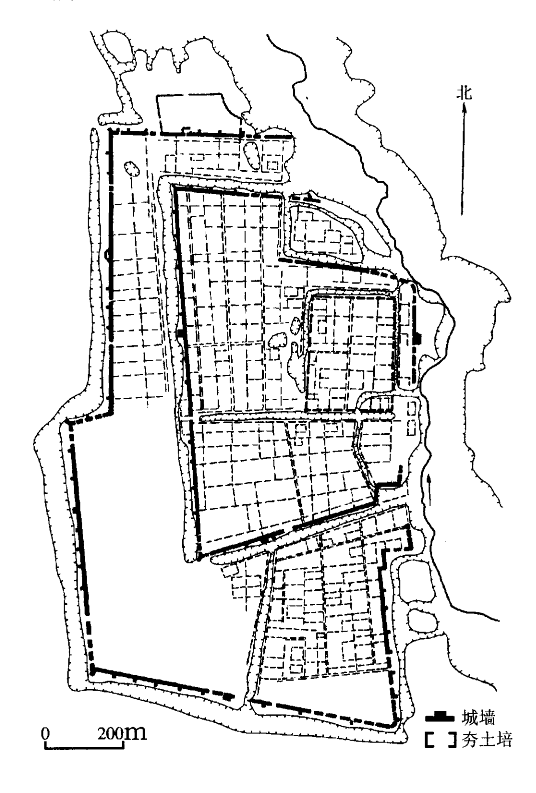


图 10.5　北庭古城航空影像解译图

根据航片解译结果，绘制出北庭古城的遗迹位置图（图 10.5）。由此得出城内布局的一个重要特征，就是城内沟渠、护城壕的两边都可能有夯土墙基。在航片分析时，发现古城内有几处浅色调双线并行的影像特征，实地踏查时发现相应位置的两边为断断续续的残墙状隆起，初步可以确定为夯土墙基；中间为凹槽状，土质似为路土，宽约 3 米，基本上可以确定为当时的道路。综上所述，可以推测当时北庭古城内沟渠、道路两旁都有夯土墙，它们把古城分割成很多小区域，这种小区域可能是古城的“里坊”结构。

北庭古城的内城中部，有一条横贯东西的沟槽，连通内城的东西城门，宽约 15 ~ 30 米，深约 1 米。外城南部，有一沟槽自外城南门向北连通内城的护城壕，宽约 12 ~ 25 米，深约 1 米。这两条沟槽判定为当时的沟渠，原因是一方面它们比较宽阔，比道路宽得多。另一方面，实地

踏查发现它们的残存深度并不比护城壕浅,沟槽底部比道路路面至少低 1 米,而且沟槽向外都与护城壕等水系相连通。此外,这些沟槽不可能是后期人工挖掘或雨水冲刷形成的,因为它们与城内遗迹关系密切,能够自成一体。

在航片分析中,还发现内城的东北部位可能是一重城圈,或者说这里可能是“宫城”的位置。这样推测的理由有三点:首先,这里东、南、北三面及西部北段有很规则的壕沟,应为人工挖掘而成,西面南段有相连通的池塘,构成了四面环水的独立布局。这种布局类似于北庭古城内外两重城圈外四面环水的布局特点。其次,这一地域的外围夯土墙基形成了一个长方形的闭合城圈,夯土墙基的保存情况也较城内其他地方的好,尤其是北面的夯土墙,不少地段至今仍有 1 米左右的残存高度。再次,地形测量时发现这一地域的地势是城内最高的,实地踏查也不难发现这一现象,这也符合古城布局中宫城地势最高的特点。

从解译结果中不难发现,北庭古城内沟渠纵横,外城、内城、“宫城”外围均有护城壕或东坝河等水体,城内还有较大的沟渠与城门连通,而且水体相互贯通,形成一个发达的水运体系。北宋太平兴国年间,王延德出使高昌时曾游历北庭,有“泛舟于池中”的记载。综合上述情况,可以进一步设想当时北庭古城内的主要交通工具是舟船,城内、城外的水上交通运输都极为便利。或许正因为如此,城内才没有宽阔的街道。

北庭古城除了农田覆盖地域外,基本上可以判断出城内的布局情况。根据航片解译结果不难发现北庭古城内的布局情况具有区域差异,大致可分为“宫城”,内城南、北部及外城南、北部五个小区域,这种区域差异可能反映不同区域内居民的等级差异、建筑物的用途不同以及建筑年代早晚等情况。

将北庭古城 1959 年航空影像与 1986 年的进行比较,可以发现东坝河的河床由河谷中心向北庭古城方向蠕移,这是由于河道弯曲,产生侧向侵蚀作用的结果。现在河床已逼近古城的东墙,对古城的保护构成极大的威胁,如果不立即采取措施,东坝河会继续向西侵蚀,冲毁古城内的重要遗迹。

10.4 新疆库尔勒至轮台间古代城址的遥感探查

中国新疆境内,有著名的古代丝绸之路从茫茫沙漠中穿过,丝绸之

路上的众多古城遗址，有如一颗颗璀璨的明珠，守候着数千年的历史与沧桑，隐藏在浩瀚的沙海之中。由于受技术和条件的局限，运用传统考古调查方法对沙漠中众多古城遗址作出全面分析和深入研究受到很大的限制，但是遥感考古技术可以在这些古城的勘察中发挥重要作用。为此选择了汉代丝绸之路重要地段的新疆库尔勒至轮台之间进行遥感考古研究，研究区域的西北角位置是东经 84°00′，北纬 42°00′，东南角位置是东经 86°20′，北纬 41°10′，范围大约是 180 公里 ×92.5 公里，包括库尔勒市、轮台县全部以及尉犁县和焉耆县部分地区（图 10.6）。

该区域的研究中，收集了 1959 年前后为测绘地形图拍摄的黑白航片，摄影比例尺为 1:6 万左右，航片规格为 18 厘米 ×18 厘米，影像质量一般，航片中心约 12 厘米 ×12 厘米范围内的影像比较清晰，周围则较为模糊。购买的航片覆盖全部研究区域，同时还收集了研究区域内 1:5 万或 1:10 万的地形图。另外购买了部分地点 2002 年拍摄的航空影像，摄影比例尺为 1:3.5 万，规格为 23 厘米 ×23 厘米，影像质量较好。同时查阅了已经发表的考古资料和县志，以便对影像解译结果进行深入分析。

10.4.1 航片处理与分析

用于测绘地形图的航空影像是垂直方式成像，几何关系稳定，影像变形很小，而且沙漠地区地面平坦，起伏很小，航片中心附近古城遗址的变形较小。该区域的研究中，首先对全部的航片资料进行目视解译，判读出一些比较典型古城遗址的影像特征，并进行分析和比较，找出它们的共性，总结古城遗址的成像规律。然后，根据这些规律对航片进行更深一层分析，对有可能是古城遗址的航片运用扫描仪进行数字化，并且利用计算机图像处理技术，对影像进行反差调整、线性拉伸、影像放大和校正、特征提取等处理。提高影像的解译效果之后，再作进一步的分析和研究，去伪存真，确定古城遗址的位置、形状、大小等属性。最后，将航片解译判读出的古城遗址进行编号，并绘制出各自的平面图，同时根据各古城周围的水系、农田、道路、村庄等的相对位置，标注在 1:5（或 1:10）万的地形图上，以此确定各古城遗址的具体位置，量算出各个古城的经纬度和高程。

在航空影像的分析和研究中，发现绝大多数古城遗址的影像特征非常特殊，也比较明显。古城遗址在航空影像上表现为图斑独特，有一定的形状，而且图斑的边缘与周围的地貌特征有明显的区别，很容易从

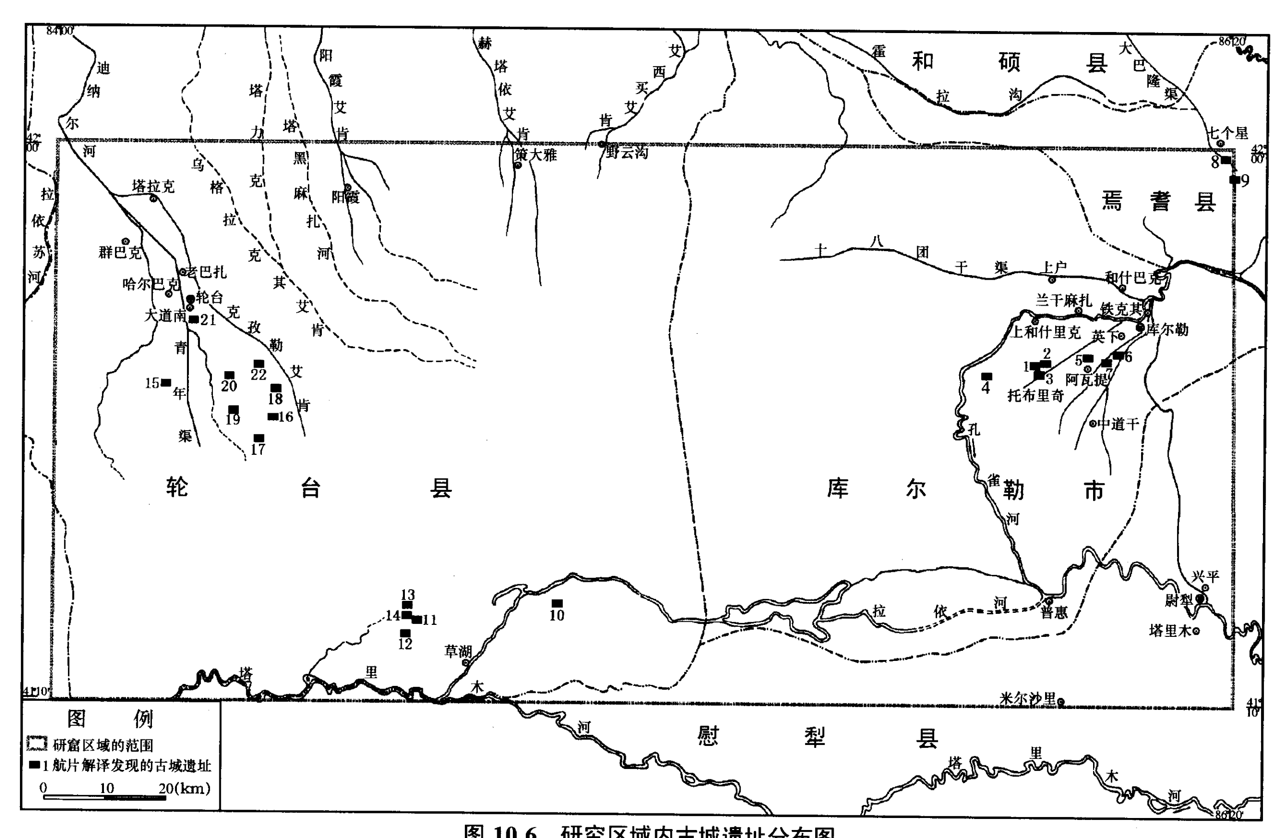


图 10.6 研究区域内古城遗址分布图

航空影像中识别出来。其中沙漠地带的古城遗址更易于判别，甚至能够发现直径或边长在 100 米以下的古城遗址。这是由于沙漠背景的影像特征非常单调，古城遗址显得比较明显，而且古城的保存情况也较好，往往残存有城圈和护城壕等遗迹。而判读城镇和农耕区域的古城遗址就显得较为困难，一方面因为这些地区的古城遗址受到的人为破坏较多，遗迹的保存情况较差，残存的遗迹往往只有断断续续的城圈；另一方面是城镇和农耕区域中，背景影像的纹理颇为杂乱，尤其是居民点附近，较小的古城遗址（直径或边长小于 190 米）往往很难判断出来。然而判读城镇和农耕区域内较大的古城遗址还是较为容易的。此外，草湖乡境内发现的 5 座古城遗址，因为靠近多次改道和泛滥的河道，背景更为凌乱，古城的保存情况也很差，有的古城甚至受到过洪水的多次冲击，因而这一地区影像的解译和分析极为不易。

在影像解译过程中，发现一些类似古城遗址的影像图斑，它们都靠近现代或古代的河道，有圆形和椭圆等形状，边缘平滑，但仔细分析后则发现它们是高位的废弃河曲。废弃河曲的形成与地质条件有关，沙漠地区土质松散，河流在发育过程中极易变形弯曲，当弯曲到一定程度时，河流又会自动取直，留下废弃河曲。废弃河曲的形状与河道的联系密切，具有明显的流水地貌的特征，所以能够与古城遗址区别开来。

10.4.2 影像解译与分析

通过航片解译，研究区域内发现了 22 座古城遗址。它们的直径或边长多在 190～500 米之间，形状有圆形、方形、不规则形等几种。遗址的保存情况较差，遗迹毁坏严重，多数城址在 1960 年时残存的遗迹只有一重或两重城圈，城内遗迹却很少发现，有的城址甚至连城圈都已全部被毁。现在，这 22 座古城中又有不少遗址毁坏于近三十年的风沙和人为的破坏之下，所以在 80 年代对该地区进行的文物普查中，有很多古城遗址没有被发现。下文对其中部分古城遗址以及早期与晚期的航空影像作一简单介绍，以下各图片中左侧为早期影像，右侧为晚期影像。

10.4.2.1 托布里奇古城

位于东经 85°56′40″，北纬 41°41′22″，海拔 901 米，托布里奇乡托布里奇村村东。略呈梯形，东墙和西墙长 170 米，南墙长 190 米，北墙长 205 米，北墙西部和南墙有豁口，南墙中部有方形高台，城外有护城

壕，南墙外正中有高台遗迹。2002 年的航片上显示城墙比较低矮，西南角损毁严重，西北角也已经损坏(图 10.7)。

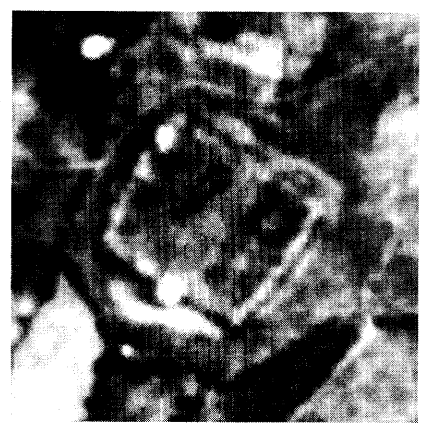
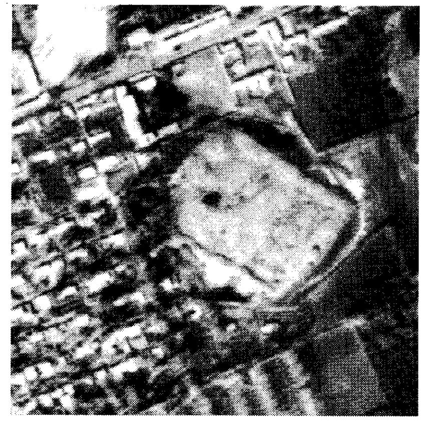



图 10.7　托布里奇古城影像图

10.4.2.2　夏哈勒墩古城

位于东经 85°49′44″，北纬 41°40′06″，海拔 899 米，包头湖农场场部南不足 1 公里。椭圆形，两重城墙，长径 280 米，短径 230 米，内城长径 190 米，短径 160 米，内有直径约 80 米的高台。航片上该古城与调查发现的夏哈勒墩古城都有两重城墙，位置、形状及外城的周长基本一致，内城城圈的大小差距较大，但该古城城内建筑基址的大小与夏哈勒墩古城内城的大小一致，二者应该表示同一遗迹，为夏哈勒墩古城。该古城现在保存情况较好，南部城墙基本上被毁(图 10.8)。

10.4.2.3　玉孜干古城

古城位于东经 86°06′36″，北纬 41°42′25″，海拔 923 米，阿瓦提乡萨依买里村村南。平面大致呈椭圆形，两重城圈，外城长径 420 米，短径 340 米；内城形状不规则，中部有长方形建筑基址。航片上该古城与已知的玉孜干古城都有两重城墙，位置、形状和外城周长等基本一致，而且城内都有高台遗迹，应该为玉孜干古城。现在古城南部和北部都因修筑公路而遭到破坏(图 10.9)。

10.4.2.4　9 号古城

位于东经 86°20′39″，北纬 41°57′15″，海拔 1053 米，七个星二大队六中队东南 3.5 公里。形状不规则，城圈北部略呈钝角，南部成锐角，两尖端相距 500 米，东西宽度 430 米，城内似有“X”形道路，中部可能




图 10.8 夏哈勒墩古城影像图




图 10.9 玉孜干古城影像图

还有一重城圈。外城北部和南部有一些城墙残迹，外部护城壕的特征非常明显，呈不规则形状。2002 的影像上城墙残迹更少，护城壕基本上都已填平，古城北部和西北部新修了几条水渠（图 10.10）。

10.4.2.5 卓尔库特古城

位于东经 84°26′41″，北纬 41°38′19″，海拔 939 米，群巴克乡苏哈提吐乎村西偏北 3 公里。古城平面呈椭圆形，长径 420 米，短径 320 米，东、南、北墙有城门，东门南侧有高台，城内中部亦有高台。航片上该古城与以前发现的卓尔库特古城的位置及周长数值基本一致，东墙

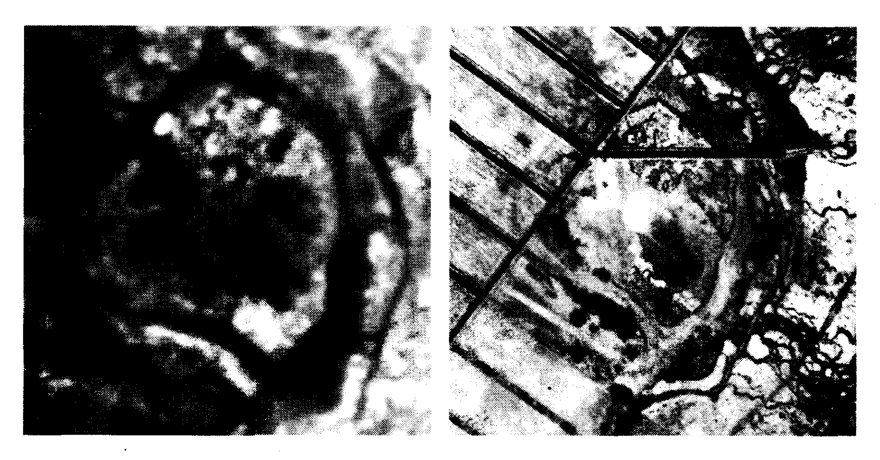


图 10.10　9 号古城影像图

中部和城内中部都有高台遗迹，基本上可以确定为卓尔库特古城。现在古城东部有一条水渠自北向南穿过，东北部的城墙严重被毁，城内西北部以及城外西侧似乎有一些植被覆盖（图 10.11）。

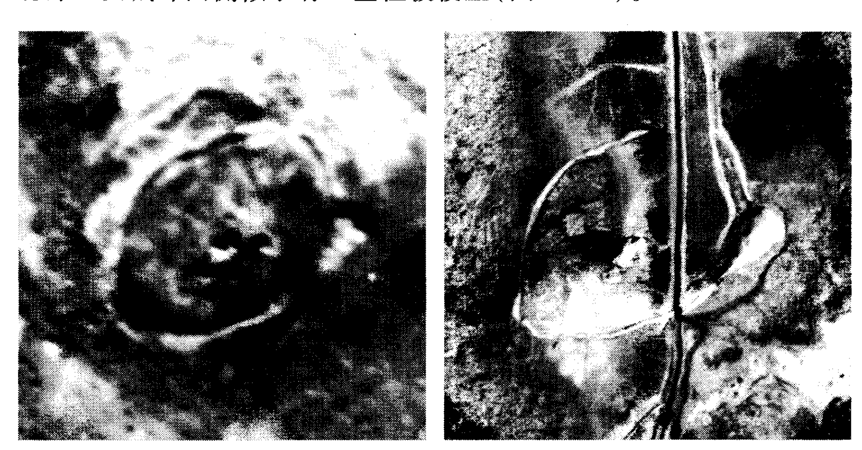


图 10.11　卓尔库特古城影像图

10.4.2.6　阔那夏尔古城

位于东经 84°20′10″，北纬 41°40′35″，海拔 956 米，县城东南 13 公里，西距卡尔塔河 3.5 公里。古城平面呈弧边三角形，周长约 700 米，西北角有城门，门外有瓮城，东南部城墙成一弧线，城内西北部有建筑基址，城外似乎有护城壕。航片上该古城与以前发现的阔那夏尔古城

的位置、形状基本一致，周长与城门、城内的土墩等情况也相同，所以应该是阔那夏尔古城。现在古城城墙基本保存完好，北部城墙上马面都很齐全，但西北部分城墙已遭毁坏，东部城墙也毁坏严重（图 10.12）。

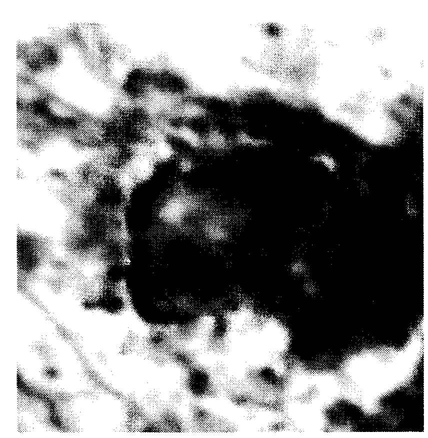
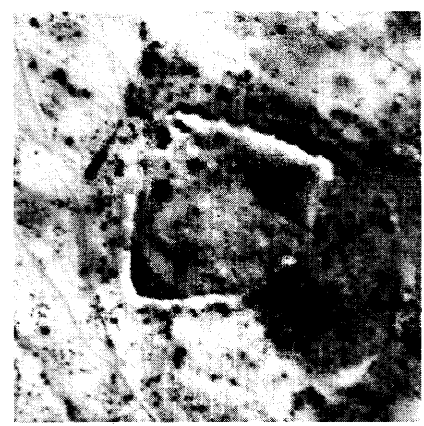



图 10.12　阔那夏尔古城影像图

10.4.3　小　结

将所发现的古城遗址标绘在图 10.6 上之后，可以看出它们的分布集中在现在的轮台县县城南部、库尔勒市南部和草湖乡附近，即分布在河流众多、水源充足的地带。充分体现出当时人们的生活与自然环境的密切关系，将轮台县县城南部和库尔勒市南部的古城遗址与现在的城镇位置相比较，可以看出相应地域的居民点有明显的向北迁移的趋势。

对上述解译结果作进一步的分析，不难发现通过这种航片解译探查出的古城遗址的直径或边长多在 180 米以上。其中小于 180 米的古城只有三座，而且这三座古城都位于背景单调的开阔地带。180 米在 1:6万比例尺的航片上只有 3 毫米，在背景凌乱的航空影像中，小于 3 毫米的图斑是无法准确地判断为古城遗址的。所以为了进一步分析古城遗址的详细布局（如马面分布、城门形制、城内建筑等等），并且对一些小的烽燧、城堡和墓葬群等进行研究，使用的航片比例尺应该在 1:1 万至 1:2 万之间，或者使用空间分辨率为 1 米以上的卫星影像。然后使用计算机图形图像处理技术，提高影像的质量，以便于航片的解译和

分析。最后还要到实地进行调查发掘，取得必要的验证资料，使研究结果更加准确可靠。

遥感考古工作中，关键之处是遥感影像的解译，即如何去识别古城遗址的影像图斑。在本区域的研究中，如果发现影像上有一定形状和大小的图斑，边缘清晰，个体独立，与田垄、古河道、现代河道等都没有必然的联系，便可以初步确定为古城遗址。其中，如果图斑的边缘有并行的浅色与深色细环，则可以确定为古城遗址，因为浅色细环为城圈的影像，而深色细环是城圈阴影的影像。细环的断线处可能是城门位置，如果断线处还有小环，则很可能是瓮城。图斑中部如果有小的深浅双色细环，说明还有内城。城内如有浅色的长方形或圆形的图斑，说明有建筑基址，如果这种图斑的某一方向围有深色细环，说明建筑基址有阴影，应该为高台遗迹。如果图斑的边缘没有深色细环，则说明该古城的城圈可能已经全部被毁。图斑边缘有断断续续的深浅双色细线时，说明城圈只剩下断断续续的残迹。如果古城遗址的外围还有一圈深色的带状影像，表明城外有护城壕遗迹。

10.5 汉长安城遥感考古研究

西汉的首都汉长安城遗址，坐落在陕西省西安市西北约 3 公里处，北距渭水南岸约 2 公里。遗址上残存的城墙绵亘起伏，显现出当时气势之壮观，规模之宏大。遗址范围内，地势平坦，现代的村镇、道路星罗棋布，土地肥沃，四时农事不断。汉长安城为西汉都城，遗迹的年代较为单一，特征丰富，有水系、道路、城墙、宫殿等遗迹可供研究和分析；遗址被农田、村庄覆盖，埋藏深度较浅，破坏程度较轻；植被随季节的不同而有规律地变化，便于进行环境因素与遗迹关系的研究。此外，汉长安城的田野考古工作已开展了多年，城内遗迹的情况也已基本查明，便于对遥感影像解译的结果进行验证和评估。

10.5.1 遥感资料的种类

汉长安城的遥感考古研究主要是分析植被、土壤对地下遗迹的反映情况，所以购买了很多种类的航片和卫星影像，以便进行综合分析合研究。遥感资料包括：

航片 1：未央宫前殿附近 1974 年 9 月 21 日拍摄的黑白航片。摄影

比例尺和航片比例尺均为 1:1 万。这个时期遗址范围内的农作物主要是处于抽穗期的玉米。

航片 2:整个汉长安城遗址 1984 年 5 月 29 日拍摄的彩色航片。摄影比例尺和航片比例尺都是 1:1 万。这个时期汉长安城内的主要植被是小麦,其生长时期处在扬花期之后,成熟期之前,也就是小麦长得最高、最密的时期(彩图 2)。

航片 3:在未央宫前殿附近 1986 年 6 月 24 日拍摄的彩红外航片。摄影比例尺和影像比例尺均为 1:4000。这一时期当地的小麦已经收割完毕,农田里植被稀少,大多为裸露而潮湿的土壤。

航片 4:整个汉长安城遗址 1990 年 6 月 3 日拍摄的黑白航片。摄影比例尺为 1:3 万,航片比例尺为 1:1 万,植被情况与航片 2 类似。

TM 影像:整个汉长安城遗址,接收日期为 1990 年 11 月 9 日。11 月份遗址内一些树木等植物的叶子已脱落,农田区域内的小麦有一定的高度,农田区域卫星影像的信息主要是土壤湿度差异反映的结果。

IKONOS 影像:约为 2003 年 3 月底接收,地面分辨率为 1 米。遗址内主要植被是小麦,处在分裂期。

10.5.2 遥感影像的初步分析

航片影像以其独特的方式记录了丰富的地面信息,以不同的纹理、色调、图案反映出丰富多彩的地表环境。对上述的航片作初步的目视判读,可以发现:

航片 1 的农田区域中,影像的纹理较粗,色调呈均匀的灰白色,从航片上可以分辨出村庄、道路、玉米地等地物,但玉米地中却分辨不出长势优劣的差异,由此可见地下遗迹对玉米生长情况影响不大。

航片 2 为彩色影像,影像的质量较好,色彩丰富,各种地物的特征都非常清晰。麦地范围内的影像特征颇为独特,麦地影像的纹理细腻,其中夹杂一些由麦垄形成的平行线纹图案,比较有规律,在同一地块中方向都是一致的,线条的两端都达到地块的边缘(彩图 2)。对麦地的影像作进一步的分析,就会在其中发现一些浅色调的图案。这种图案分矩形和折线形两类,与上述麦垄形成的图案有着明显的区别,不过这种图案较为模糊,尤其是与麦垄方向一致的图案边缘往往不易辨认。这些图案是由于相应位置的小麦长势较差引起的,由此可以判断出在这些位置可能有考古遗迹。

航片 3 为彩红外航片，影像的比例尺较大，色调鲜艳、丰富，地物边缘清晰，适合于判读城址考古中细微的遗迹情况。同时由于彩红外影像中加入了近红外波段的地面信息，所以易于判读较小的土壤差异。但是，该航片除了清晰的地表信息外，分辨不出任何地下遗迹。也就是说，此时的航空影像对地下遗迹没有反映。

航片 4 为由底片放大三倍的黑白影像，影像的质量稍差，纹理较粗，地物的边缘有些模糊，麦地影像的特征不如彩色影像的特征完整。但它同样能反映出地下遗迹的一些线索，只是不如航片 2 清晰。

TM 影像经过计算机处理之后，显示出大量的异常图斑，将其与航空影像进行合成处理，便可以确定异常图斑的相对位置。未央宫及其附近地区的合成遥感影像上，地下建筑基址等遗迹呈现较强的亮反射，可以清晰地分辨出武库的位置和范围，以及未央宫前殿及其周围的建筑群等遗迹，这些影像图斑的形状都呈较为规则的矩形，范围较大，容易识别。当时的道路、水系等呈现较暗的弱反射，由此能够辨认沧池及其附近的水道等遗迹（彩图 3）。

IKONOS 影像上植被长势旺盛，影像色彩丰富，地面地物图斑非常清晰，麦地中色调均匀，纹理细腻，地下遗迹反映非常微弱。

上述遥感影像中，航片 1、航片 3 与 IKONOS 影像对地下遗迹几乎没有反映，所以不作进一步的分析和处理；航片 2、航片 4 的拍摄季节相同，对地下遗迹的反映情况也相似，所以只选择最佳航片（航片 2）进行处理。为了简洁明了地说明问题，本节选择未央宫前殿西北的一小片区域的航片进行计算机处理和解译。这一区域中的遗迹很多，有地面的也有地下的，有宫殿基址也有当时的渠道，因而具有代表性。

10.5.3 航片解译及验证

将所选择区域的航片用彩色图像扫描仪输入到计算机中，进行影像的反差增强、彩色饱和度调整等处理，得到如彩图 2 所示的影像。影像的质量有了很大程度的提高，许多原先比较模糊的特征都得到了增强，能够清晰地显示出来，便于进行影像的目视判读和分析。

结合汉长安城的考古资料，对彩图 2 中的影像进行综合解译，不难发现地面遗迹的特征都非常清晰，如这一区域中的地面遗迹未央宫前殿基址和石渠阁基址；同时，由植被（小麦）标志反映出的地下遗迹也很多，这些地下遗迹根据其图案特征可分为折线形和矩形两

类，图案的颜色都很浅，是负向植被标志，这是由于遗迹上的小麦长势较差而形成的，其中的折线形遗迹很不规律（图中以 I 和 II 表示的遗迹）。根据以往的考古资料无法解释其存在的理由，但是将其与 20 世纪 50 年代测绘的 1∶5 万的地形图相比较，就会发现这些折线处是那个时期的小路。这一区域中矩形图案的遗迹很多，严格地说也是分为两种，其一为矩形框图案，其二为矩形图案。这些图案反映的遗迹可以判断为西汉时期的宫殿等的夯土建筑基址。因为这些图案颇为类似，所以在彩图 2 中只用矩形框标绘出其中的四个图案，分别编号为图案 A、B、C、D（为了不破坏遗迹的影像特征，矩形框都加在遗迹图案之外，所以比遗迹的实际范围大一些），其中图案 A、C、D 为矩形图案，B 为矩形框图案。

为了检验航片解译结果的正确性，需要进行实地钻探验证。图案 A 比较明显，实地钻探发现此处在地下 50 厘米深处见夯土，判断为夯土建筑基址应该是正确的，而这里的小麦长势矮小、稀疏，与其周围小麦的差异比较明显；B 处为框架形图案，实地钻探发现框架的相应位置上地表以下深 30 厘米左右见夯土，框架内外则无夯土，所以这里应该是建筑物的墙基，只是在墙基上有夯土，其他地方则无夯土；C 处的图案西半部在麦地范围内，航片上比较明显，而东半部的地面空旷，没有植被，遗迹特征较为模糊，但可以判断出一些迹象；D 处的情况较为复杂，根据航片解译的结果不能作出肯定的判断，但是结合以前的考古资料，证实这里是一处大型的宫殿基址。

对整个汉长安城的航片资料进行解译，可以发现大量的夯土建筑基址、两条主要街道和沧池的大致轮廓，其中街道的影像特征很不明显，色调比其周围环境稍暗一些，也为负向植被标志。在多处建筑基址进行实地钻探后，发现遗迹的情况大致与上文所述的 A、B、C、D 处类似，遗迹的埋藏深度在 100 厘米左右。沧池位置的影像色调比其周围环境则稍深一些，是典型的正向植被标志。

10.5.4 小　结

汉长安城的遥感探测工作，对遗迹与环境因素的关系作了较为全面的分析，得出的结论是：由趋于成熟期小麦产生的植被标志能够较好地反映出地下遗迹的特征，其反映深度在 130 厘米以内，而潮湿且裸露的土壤和玉米却不能反映出地下遗迹的情况。究其原因，可能是因为

小麦的根系发达，成熟期前后根系的长度在100厘米左右，所以在这个深度内地层的堆积情况能影响到小麦的长势。同时，小麦在幼苗期因其根系短浅，根须尚未生长到耕土层以下的考古遗迹的深度，所以地下遗迹对此时的小麦生长还没有产生影响，而随着小麦的不断生长，遗迹的植被标志渐渐明显起来，到抽穗期前后达到最佳效果，小麦成熟枯黄后又会失去这种标志。玉米的根系很浅，所以地下考古遗迹不会影响到长势的差异，因而不会形成遗迹的植被标志。土壤标志在TM影像上有较好的反映，能够据此发现很多地下遗迹。

10.6 安阳殷墟遥感考古研究

殷墟为商王朝最后的都城，位于河南省安阳市西北郊的洹河两岸。据文献记载，自盘庚迁都于此至纣王（帝辛）亡国，整个商代后期皆以此为都，历时273年，年代约为公元前14世纪至公元前11世纪。

10.6.1 遥感资料的种类及其特征

现在，殷墟范围内可供进行遥感考古研究的面积很小，大致是东、北面以洹河为界，南至安钢铁路，西至安阳钢铁公司东墙。这是能够进行遥感考古研究的主要范围，洹河以南的其他地域因现代建筑的覆盖而很难开展这方面的研究。这次研究中收集的遥感资料有四种：

1. 1984年4月22日的彩红外航片，摄影比例尺为1∶20000。

4月下旬，安阳地区农田里的小麦、树木等植被正处在生长旺季，绿叶葱茏。麦地在彩红外影像上形成品红色网格状图斑，边缘清晰，颜色鲜艳，纹理较为细腻。建筑物、道路、空地等呈现浅灰色调，水体为青灰色或黑色。

2. 1996年夏季的全色黑白航片，摄影比例尺为1∶35000。

殷墟范围内的黑白航片上，麦地、水体、树木的色调较深，麦地的图斑为网格状，树木呈现绒球状的图斑，建筑物、道路等地物的色调较浅，易于辨认。

3. 1987年4月17日和1993年10月19日的TM影像。

TM影像中有近红外和中红外波段的信息，对地表土壤湿度的反映比较敏感，有利于进行遥感考古研究。根据地表土壤等的局部湿度异常在影像上产生的特殊图斑，能够判断出一些地下遗迹的分布情况。

但是，TM 影像的地面分辨率为 30 米，只能反映地表的宏观形态特征，除了相当大面积的遗迹现象之外，TM 影像反映的是若干遗迹现象的综合形态，它经过了较大的概括和综合。较小的遗迹现象很难在 TM 影像上产生明显的反映，而且定位精度很低，需要在影像处理中解决。

4. 2003 年 3 月 27 日的 QuickBird 影像。

QuickBird 影像具有非常高的地面分辨率，各种地物的成像都非常清晰，影像色调纯正自然。3 月下旬遗址内农田里的小麦处在分裂期，很多树木刚刚长出新叶。QuickBird 影像中麦地中出现了微弱的异常，但很难分辨。

10.6.2 遥感影像的处理

在 TM 影像处理过程中，首先运用影像处理软件，对两期 TM 数据的各波段影像进行剪切，截取各波段影像中安阳市及其附近地区相同位置的影像，并对各波段影像进行反差增强处理，将各波段影像中灰度过于集中分布的像元数值拉开，增加影像的层次，提高影像的判读效果（图 10.13）。

然后在计算机中进行彩色增强处理，它包括假彩色合成和假彩色等密度分割两种。假彩色密度分割是针对单波段影像的处理，根据像元数据值的大小划分成一定数目的区间，每个区间赋予一种颜色，以便得到一幅新的影像。由于 TM 影像的地面分辨率只有 30 米，地下异常很难定位，所以需要与高分辨率影像进行叠加或融合等处理。假彩色合成是选择三个波段影像，分别赋以红、绿、蓝三原色合成新的影像，然后进行反差增强与色彩平衡调整等处理，提高影像的质量与判释效果。经过多种方法的处理和分析，发现 1993 年 10 月 19 日的 TM 影像上有大量的异常图斑，于是对其作进一步的分析和处理。而其他遥感影像上殷墟范围内地下遗迹没有产生明显异常，这些影像数据不作后续处理。

相对于几种航空影像而言，QuickBird 影像成像时间最晚，也最为清晰，能够很好地反映现在的地表情况。所以在影像处理过程中，以 QuickBird 影像为基础，对 1993 年的 TM 影像进行纠正和处理。TM 影像中第七波段影像（TM7）对地下异常的反映最为强烈，将其进行假彩色密度分割之后变成彩色影像，通过色彩的不同显示地下异常分布特征，然后再与 QuickBird 影像进行叠加，得到一幅新的影像（彩图 4）。新影像上的异常分布在地块影像之间或内部，色调较浅，边缘较清晰，

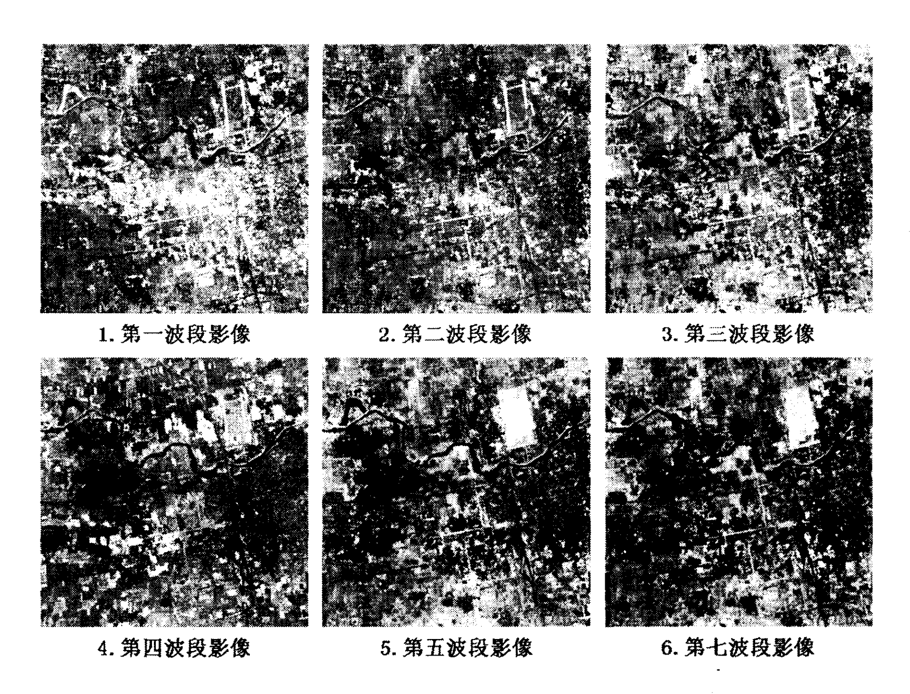


图 10.13　1993 年 10 月 19 日获取的各波段 TM 影像

通过影像处理后能够明显地反映出来，并且能够较为准确地确定各异常的位置。

10.6.3　遥感影像的解译与分析

遥感影像上影像色调的深浅及其所形成图案的差异，是地面（包括浅表地层）物体或现象反射或发射电磁波强弱不同的反映和记录，标志着地面物体或现象自身的光谱特点。所以在遥感影像上色调的微小变化就会反映出物体或现象的不同。

安阳地区的农业耕作情况大致是每年 6 月至 9 月种植玉米，10 月至翌年 5 月种植小麦。4、5 月份是小麦的生长旺季，从理论上说地下遗迹应该在遥感影像上产生植被标志，但是两种航空影像、QuickBird 影像和 1984 年 4 月 17 日的 TM 影像上都没有发现明显的影像异常。安阳地区 9 月底至 10 月初种植小麦，10 月中旬的麦苗长度不足 5 厘米，树木则是枝繁叶茂，TM 影像上农田区域内的信息主要是土壤的反射信息，而麦苗的反射信息及其微弱，色调较浅；树木的影像在 1、2、3

波段上的色调较浅，在4、5、7波段上的色调较深（图10.13）。由此可以区分影像上由树木、村庄产生的图斑；水体在各波段的影像上呈现黑色；建筑物与道路在各波段上呈现为浅色调。

TM影像具有近红外、中红外和热红外波段的信息，为判释土壤中湿度差异等提供了有利的条件。1993年10月19日的TM影像上，小屯村西北地与北地、四盘磨村西南至安阳工作站西墙外等地，在TM影像的1、2、3、5、7等波段均出现浅色调的图斑（图10.13），经过彩色增强处理后，异常现象更加明显。这种图斑在可见光与中红外等波段上均为浅色调，相应地域应该是较为干燥、致密的土壤，或者说，相应地域可能有很多夯土建筑基址、墓葬等遗迹。

10月中旬，安阳地区的气候较为干燥，降水很少。而1993年的10月中旬，安阳地区从14日至19日天气晴好，气温较高，地表土壤干燥，所以19日接收的TM数据能够很好地反映地表以下地层的情况。

研究区域内面积较大的强反射图斑大致分为：(1) 现在的体育场周围，北部面积约450米×360米，并向南延伸为带状地段，1993年10月底至12月考古研究所安阳考古队在此进行了发掘，证实此处分布有较密集的夯土填实的殷代墓葬，TM影像是发掘之前收集的遥感资料，发掘之后建造了体育场；(2) 四盘磨村南与东南、小庄村北，东至安阳工作站西墙外；(3) 小屯北地至花园庄村南，从影像上分析，似乎是连成一片的，只是中间被小屯村和花园庄村覆盖。

在王裕口以西的大片地域内，有很多零星的小面积强反射图斑，其中黑水渠与安钢铁路交叉点西北的浅色图斑，在1997年夏季的发掘中被证实为一处宗庙基址。

10.6.4 田野钻探与结论分析

上述三处大面积异常区域中，体育场周围已经被以往的发掘所证实，小屯北地至花园庄村南的大部分地域都被现代村庄覆盖，不便于开展钻探验证工作。四盘磨村南与东南、小庄村北的异常区域内可以进行钻探验证。这次钻探的探孔间隔大都为10米，只是在中国社会科学院考古研究所安阳工作站西墙外的少数探孔的间隔为5米，探孔打至生土层为止，生土层埋藏较深时，一般不超过6米，只有极少数探孔的深度超过6米。探孔的位置如彩图5所示。钻探发现研究区域内商代文化层的埋藏深度超过1米。

钻探的目的是要大致了解异常区域内的地层情况，所以钻探时探孔的间隔为10米。10米的间隔肯定会漏掉不少考古现象，钻探结果所反映的只是概略情况，但相对于地面分辨率为30米的TM影像而言，10米间隔基本上能够满足研究需要。在钻探过程中，很多探孔中出现一种硬灰土，土质介于夯土与灰土之间，夹杂有夯土碎块，有的探孔中出现漆皮等物品，应该为商代墓葬。据此可以推测这种硬灰土应该是经过简单加工的填土或垫土，与普通灰土有着较大的差别。

将遥感影像与钻探结果进行比较，可以推测TM影像上大面积的强反射区域，应该是该地域内众多夯土遗迹的整体反射的结果，其间散布的更强反射的小面积图斑，一般是单个夯土遗迹或彼此相距很近的几个夯土遗迹的反射，这种情况与王裕口以西的众多小面积强反射图斑极为类似。

相对于遥感影像上较强反射的图斑，研究范围内还有一些较暗的反射区域，产生这种反射的地物类型有三种：其一是村庄、树木及其阴影（如各村庄及其周围）；其二是水系附近较为潮湿的地带（如白家坟村东黑水渠两侧）；其三是地下夯土遗迹稀少或没有的地域（如安阳工作站的北部、王裕口村北、小庄村东等地），这一地域没有树木覆盖，影像的色调较深，纹理平滑细腻。

曾经发掘的西北冈王陵区的面积较大，墓葬密集，但相应地域没有出现明显的大面积异常图斑，其原因很可能是墓葬群发掘之后，夯土层已经被破坏。这一地域中一些小的图斑，应该是一些尚未发掘的墓葬的反射。

10.6.5 小　结

安阳殷墟的遥感考古研究中，运用计算机图像处理技术，将分辨率较低而光谱特征丰富的TM影像与几何关系稳定的航空影像一起进行综合处理，充分发挥各种影像的优势，大大提高了遥感影像的质量。通过对殷墟范围内遥感影像的分析和研究，并配合以往的考古发掘和田野钻探验证等工作，可以总结出以下几点：

1. 地下的夯土基址等考古遗迹，在地表土壤干燥而裸露的季节，能够在TM影像上形成较为明显的遗迹标志，特别是中红外波段的TM影像对地下遗迹有很好的反映效果，能够反映出地下遗迹的总体布局情况，但受TM影像地面分辨率的限制，不能准确反映出单个遗迹的特

征。但是,有较强反射的地方,并非一定有考古遗迹,所以,影像解译时要以现有的考古资料为前提,而且要与地面调查与钻探工作相结合,去伪存真。

2. 殷墟范围内,考古遗迹的埋藏深度在 1 米以下,遥感影像上没有因农作物生长情况的差异,形成明显的遗迹植被标志。其原因可能是农作物根系的长度一般不超过 1 米,农作物的生长不受地下考古遗迹的影响。

3. 在遥感考古研究中,应该使用计算机图像处理技术,将 TM 影像与航空影像或高分辨率卫星影像一起进行综合处理,结合两种影像的优点,提高影像的质量,增强影像的解译效果。

4. 除小屯东北的殷墟宫殿区范围之外,仍然存在有较大面积的建筑基址。四盘磨东南应该有很多建筑基址,四盘磨西南很可能是墓葬区。而且,在目前能够开展工作的范围内,即东、北面以洹河为界,南至安钢铁路,西至安阳钢铁公司东墙,通过现有影像分析没有发现城墙遗迹。

安阳殷墟的遥感考古研究中,成功地使用 TM 影像与高分辨率影像的信息,对殷墟范围内夯土基址等遗迹的总体情况进行了探查和定位,发现了一些新的殷代建筑基址和墓葬等遗迹,为殷墟的考古学研究提供了最新线索,同时也为城址遥感考古研究积累了成功的经验。

10.7 南方古城遗址影像分析

我国南方省份降水充沛,水土侵蚀严重,地面植被茂盛,考古遗址很难完整地保留下来,不易使用常规的遗迹标志对遥感影像进行分析,开展遥感考古工作的难度很大。所以只有在地表有一定残存遗迹的情况下,才能够对考古遗址的遥感影像进行分析和研究。

10.7.1 广西浦北县旧州古城

旧州古城位于浦北县泉水乡旧州村,城圈为土筑而成,分子城和外城,南流江从城东南流过。1960 年的航空影像上梯形的子城与不规则的外城非常清晰,子城在外城的东侧,城外应该有护城壕,子城的西部伸入外城内(图 10.14 左)。由于人为的破坏,现今仅存子城,而且其西南角已经毁坏。外城除北面尚存部分残墙外,其余已被辟为耕地,基本上无法辨认(图 10.14 右)。实地调查发现子城东西长约 165 米,南

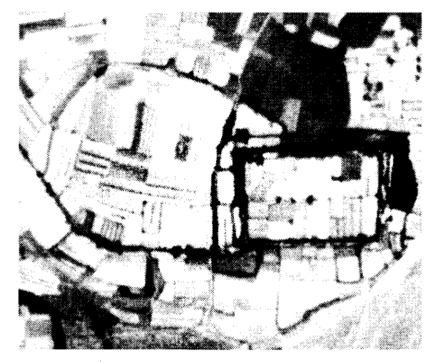



图 10.14 旧州古城影像图

北宽约 110 米，墙残高 3 ~5 米。城角外突，有明显的角楼建筑特征。

10.7.2 广西浦北县钦州古城

钦州古城位于灵山县城西 61 公里的旧州乡旧州村西，北靠山岗，东南临旧州河。城内现为耕地，东西长 270 米，南北宽 135 米。城墙用杂土夯筑而成，内含碎砖瓦、陶瓷片等物，墙基厚 14 米，残顶厚 8 米，残高约 3 米。城内偏东北处有一夯土台基残迹，长 12 米，宽 11 米，高1.5 米。北墙西段外尚可见到数十米长的护城壕痕迹，北门也尚可辨认。城址已遭部分破坏，东城墙被毁 76 米，北城墙被毁 16 米，有公路从城西北通过（图 10.15）。

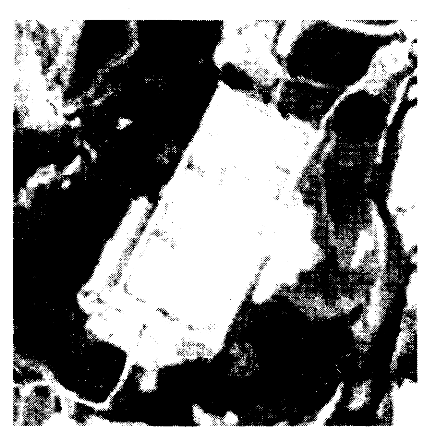
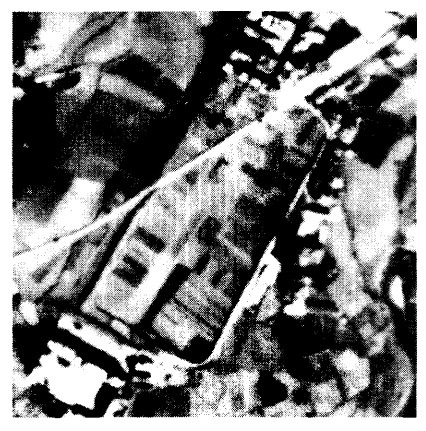



图 10.15 钦州古城影像图

中国两广等地有大量汉、唐时期的古城遗址，一般规模不大，现在的保存状况普遍较差，很多古城已经全部被毁。但在20世纪60年代，很多古城遗址的保存情况非常完好，那时拍摄的航空影像上很多古城还清晰可辨，为那些古城遗址的研究提供了珍贵的资料。

10.8 结　　语

遥感考古技术在古城遗址的研究中作用尤为明显，特别是在地表残存一定遗迹的情况下效果更好。遥感考古技术能够从不同的空间角度，利用多种地面信息，运用计算机图像处理技术，对古城遗址作全方位的分析和研究，速度快，周期短，方法灵活多样，能节省大量的人力、物力和时间，为城址考古提供科学而合理的依据。

与欧美遥感考古的应用程度和效果相比，遥感考古勘探技术在国内的应用仍然有很大的局限。这主要是因为欧美的很多考古遗址中残存的古代建筑基址、墓葬等都是砖石结构，与周围环境中的土壤有很大的差别，可以在遥感影像上产生很大的差异；而中国的考古遗址大多由夯土构成，与周围土壤没有什么明显的差别，只是稍微紧密一点，只是在特定情况下接收的遥感影像上才能产生一些细微差异。本章介绍的一些实例其实还不能代表考古遗址的普遍情况，在对很多遗址的研究中，遥感影像分析与地球物理探测都是无功而返的，甚至对那些通过传统方法已经探测出来的城墙与墓葬也无能为力，探测未知考古遗迹的难度就更大。

但遥感技术为考古学研究提供了大量的实时地面信息，在遗址的成图、研究、保护、监测和复原等方面具有重要的作用。随着遥感和计算机等相关科学的不断进步，遥感影像的地面分辨率会有很大程度的提高，波谱特征更加丰富，遥感设备与图像处理的方式也更加多样化，特别是高分辨率雷达卫星数据等的广泛应用，遥感考古技术应该会有长足的进展，发挥越来越重要的作用。

第十一章　考古地理信息系统的应用与研究

11.1　地理信息系统简介

11.1.1　基本概念

11.1.1.1　信息

信息(Information)是用数字、文字、符号、语言等介质来表示事件、事物、现象等的内容、数量或特征。信息向人们(或系统)提供关于现实世界新的事实的知识,作为生产、管理、经营、分析和决策的依据。信息具有客观性、适用性、可传输性和共享性等特点。

信息来自数据(Data)。数据是未加工的原始资料,是客观对象的表示,是信息的载体,包括数字、文字、符号、图形和影像;信息则是数据的内涵,是数据的内容和解释。例如,从区域考古调查数据中能够提取各时期聚落分布特征等信息。

11.1.1.2　地理信息

地理信息(Geographic Information)属于空间信息,是指与所研究对象的空间地理分布有关的信息,它表示地表物体及地理环境所固有的数量、质量、性质、关系、分布特征和规律的数字、文字、图像、图形信息的总称。地理信息具有空间性、专题性和动态性。

11.1.1.3　信息系统

信息系统(Information System)是具有采集、处理、管理和分析数据能力的计算机系统,它能为单一的或有组织的决策过程提供各种有用信息。信息系统是由计算机硬件、软件、数据和用户四大要素组成的系统。其中的数据包括一般数据和经数据挖掘获得的知识;用户包括一般用户和从事系统建立、维护、管理和更新的高级用户。

从管理的角度看,信息系统涉及战略层、用户层和操作层。战略层是决定信息系统方向的战略决策者;用户层是使用信息系统的高、中层管理人员;操作层主要是操作人员。

11.1.1.4　地理信息系统

地理信息系统简称 GIS(Geographical Information System),属于空间信息系统。它是 20 世纪 60 年代开始迅速发展起来的地理学研究技术系统。它作为计算机技术、地理、遥感、测绘、统计、规划、管理学和制图学等学科交叉运用的产物,代表了现代计算机应用技术和其他学科相互渗透的发展方向。GIS 技术是以地理空间数据库为基础,在计算机软件和硬件的支持下,采用地理模型分析方法,运用系统工程和信息科学的理论,对整个或部分地球表面(包括大气层)与地理空间分布有关的数据进行采集、管理、操作、分析、模拟和表达,为地理研究和地理决策服务提供多种空间地理信息的技术系统。GIS 具有以下三个方面的特征:

1. 具有采集、管理、分析和输出多种空间信息的能力,具有空间性和动态性;

2. 以地理研究和地理决策为目的,以地理模型方法为手段,具有区域空间分析、多要素综合分析和动态预测能力,产生高层次的地理信息;

3. 由计算机系统支持进行空间地理数据管理,并由计算机程序模拟常规的或专门的地理分析方法,作用于空间数据,产生有用信息,完成人类难以完成的任务。

所以,GIS 是由计算机硬件、软件、地理数据和人共同组成的有效地获取、存储、更新、操作、分析和显示所有地理信息的集成应用系统。数据是地理信息系统的基础,是地理信息系统的基本组成,数据包括图形数据、图像数据和属性数据三类。GIS 的硬件包括计算机主机、数字化仪、图像扫描仪、绘图仪、打印机、磁带(盘)机等;其软件包括五个基本模块:数据输入和检验、数据存储和管理、数据变换、数据输出和表示、用户接口等。从外部来看,地理信息系统表现为计算机软硬件系统,而其内涵是由计算机程序和地理数据组织而成的地理空间信息模型,是一个逻辑缩小的、高度信息化的地理系统。

地理信息系统是整个地球或部分区域的资源、环境数据在计算机中的缩影。严格地讲,地理信息系统是反映人们赖以生存的现实世界(资源与环境)的现状与演变的各类空间数据及描述这些空间数据特征的属性数据,在计算机软件和硬件的支持下,按照一定的格式输入、存储、检索、显示和综合分析应用的技术系统。随着计算机技术、空间

技术和现代信息基础设施的飞速发展,GIS 技术在各国经济信息化进程中日渐重要。特别是当今“数字地球”概念的提出,使得人们对 GIS 的重要性有了更深刻的了解和更直观的认识。20 世纪 90 年代以后,地理信息系统在全球得到了空前迅速的发展,应用领域不断扩大,产生了巨大的经济和社会效益。

11.1.2 GIS 的类型

GIS 可以根据其数据内容的不同分为三大类型:

1. 专题地理信息系统(Thematic GIS),是具有有限目标和专业特点的地理信息系统,为特定的专业目的服务。例如,森林动态监测信息系统、水资源管理信息系统、草场管理信息系统、水土流失信息系统等。

2. 区域地理信息系统(Regional GIS),主要以区域综合研究和全面的信息服务为目标,可以有不同的规模。如国家级、省级或地区、市级和县级等为不同级别行政区服务的区域信息系统,也可以按自然分区或流域为单位划分区域系统。

许多实际的地理信息系统,是介于上述二者之间的区域性专题信息系统。如洛阳盆地考古信息系统。

3. GIS 工具(GIS Tools),是一组具有图形数字化、存储管理、查询检索、分析运算和多种输出等 GIS 基本功能的套装软件。它们或者是专业设计研制的,或者是在完成了实用 GIS 后剔除具体区域或主题式的地理空间数据后得到的,具有对计算机硬件适应性强、数据管理和操作效率高、功能强的特点。

在通用的地理信息系统工具支持下创建区域或专题地理信息系统,不仅可以节省软件开发的人力、物力、财力,缩短系统创建周期,提高系统技术水准,而且使 GIS 技术易于推广,并可以使地理学研究者将更多的精力投入高层次的应用模型开发上。

11.1.3 GIS 软件的主要功能

GIS 软件的主要功能是实现空间数据输入与输出、图形及属性数据编辑、空间数据库管理、空间数据处理和分析以及专业应用模型等。

1. 空间数据输入管理

空间数据输入管理是将现有地图、野外测量数据、调查记录、遥感影像等数据转换成软件所要求的数字格式,再进行存储。田野考古调

查、发掘的各种资料都可以输入到 GIS 之中，建立考古 GIS 数据库。

2．图形及属性数据编辑

GIS 都具有很强的图形编辑功能，用于编辑修改原始输入有误的数据，进行系统数据的更新，修饰图形，设计实体的线型、颜色、符号、注记等，还要创建拓朴关系、进行图幅接边、输入和修改属性数据，等等。

3．空间数据库管理

GIS 数据库是空间数据库，空间数据库不仅涉及的数据类型多、内容多，且数据量大。这些特点决定了它既要遵循常规关系型数据库管理系统管理数据，又要采用一些特殊的技术和方法，以管理常规数据库无法解决的空间数据问题。

4．空间数据查询和分析

GIS 软件可以进行空间数据查询和分析，满足空间查询的要求，进行地形分析、网络分析、叠置分析、缓冲区分析、决策分析等工作。随着 GIS 技术的持续发展，空间分析的功能将不断增加。

5．空间数据输出管理

GIS 中输出数据种类很多，输出方式可以是图形、报表、文字、图像等。输出介质可以是纸、光盘、磁盘、显示终端等。随着输出数据类型的不同和输出介质的不同，需配备不同硬件和软件，最终向用户报告分析结果。

6．应用模型和应用系统开发

由于 GIS 应用范围越来越广，GIS 软件平台提供的基本处理和分析功能很难满足所有用户的要求。用户可根据各类应用模型，基于组件技术开发各种 GIS 应用系统。

11.1.4 地理信息系统发展简史

11.1.4.1 国际上 GIS 的发展

GIS 是 20 世纪 60 年代中期开始发展起来的交叉学科，最初是为了解决地理问题，至今已成为一门涉及测绘科学、环境科学、计算机技术等多学科的交叉学科。1963 年加拿大测量学家 R. F Tomlinson 首先提出地理信息系统一词，并建成世界上第一个 GIS（加拿大地理信息系统 CGIS），用于自然资源的管理和规划。不久，美国哈佛大学提出了较完整的系统软件 SYMAP，成为 GIS 起步的标志。

地理信息系统的存在与发展历时 40 余年，纵观 GIS 的发展，并且

根据北美地区的实际情况，可将地理信息系统的发展分为以下几个阶段：

(1)20 世纪 60 年代为 GIS 的开拓期，注重于空间数据的地学处理，初期地理信息系统发展的动力来自于诸多方面，如学术探讨、新技术应用、大量空间数据处理的生产需求等。对于这个时期地理信息系统的发展来说，专家兴趣以及政府推动起着积极的引导作用，并且大多地理信息系统工作限于政府及大学的范畴，国际交往甚少。

由于计算机硬件系统功能较弱，限制了软件技术的发展。这一时期地理信息系统软件的研制主要是针对具体的 GIS 应用进行的。到 60 年代末期，针对 GIS 一些具体功能的软件技术有了较大进展。

(2)70 年代为 GIS 的巩固发展期，注重于空间地理信息的管理。计算机硬件和软件技术的飞速发展，尤其是大容量存取设备——硬盘的使用，为空间数据的录入、存储、检索和输出提供了强有力的支持。用户屏幕和图形、图像卡的发展增强了人机对话和高质量图形显示功能，促使 GIS 朝着应用方向迅速发展。一些发达国家先后建立了许多不同专题、不同规模、不同类型、各具特色的地理信息系统。但这一时期系统的数据分析能力仍然很弱，在 GIS 技术方面没有新的突破，系统的应用与开发多限于某个机构。专家个人的影响削弱，而政府影响增强。

(3)80 年代是 GIS 的突破阶段，随着计算机软、硬件技术的发展和普及，地理信息系统也逐渐走向成熟。由于微机系统的软件环境限制较严，使得在微机 GIS 中发展的许多算法和软件技术具有很高的效率。这一时期是地理信息系统发展的重要时期，注重于空间决策的支持和分析，应用领域迅速扩大，从资源管理、环境规划到应急反应，从商业服务区域划分到政治选举分区等，涉及了许多学科与领域，如古人类学、景观生态规划、森林管理、土木工程以及计算机科学等。许多国家制定了本国的地理信息发展规划，启动了若干科研项目，建立了一些政府性、学术性机构。这个时期地理信息系统发展最显著的特点是商业化实用系统进入市场。

(4)90 年代是 GIS 社会化阶段，随着地理信息产业的建立和数字化信息产品在全世界的普及，地理信息系统深入到各行各业乃至千家万户，成为人们生产、生活、学习和工作中不可缺少的工具和助手。一方面，地理信息系统已成为许多机构必备的工作系统，尤其是政府决策部门在一定程度上由于受地理信息系统影响而改变了现有机构的运行

方式、设置与工作计划等。另一方面,社会对地理信息系统的认识普遍提高,需求大幅度增加,从而导致地理信息系统应用的扩大与深化。国家级乃至全球性的地理信息系统已成为公众关注的问题。

11.1.4.2 中国 GIS 的发展

中国 GIS 的发展较晚,经历了起步(1971 - 1980)、准备(1981 - 1985)、发展(1986 - 1995)、产业化(1996 以后)等四个阶段。现在,GIS 已在中国的很多部门和领域得到了广泛的应用,并引起了政府部门的高度重视。一批具有自主知识产权的 GIS 软件(如 GeoSTAR、SuperMap GIS、MapGIS、CityStar 等)已经研制开发成功,很多高等院校设立了一些与 GIS 有关的专业或学科,还有很多专门从事 GIS 产业活动的高新技术产业相继成立。此外,还成立了"中国 GIS 协会"和"中国 GIS 技术应用协会"等,并且经常召开 GIS 方面的学术研讨会。

中国地理信息系统方面的工作始于 20 世纪 80 年代初,以 1980 年中国科学院遥感应用研究所成立全国第一个地理信息系统研究室为标志。在几年的起步发展阶段中,中国地理信息系统在理论探索、硬件配制、软件研制、规范制订、区域试验研究、局部系统建立、初步应用试验和技术队伍培养等方面都取得了进步,积累了经验,为在全国范围内展开地理信息系统的研究和应用奠定了坚实的基础。

自 1985 年起,地理信息系统研究作为政府行为,正式列入中国国家科技攻关计划,开始了有计划、有组织、有目标的科学研究、应用实验和工程建设工作。很多高校和科研机构同时展开了地理信息系统的研究与开发工作,如全国性地理信息系统(或数据库)实体建设、区域地理信息系统的研究和建设、城市地理信息系统的研究和建设、地理信息系统基础软件或专题应用软件的研制和地理信息系统教育培训等。通过近五年的努力,打开了地理信息系统应用的新局面,并在全国性应用、区域管理、规划和决策中产生了实际的效益。

20 世纪 90 年代,地理信息系统跨入快速发展阶段。各相关部门执行地理信息系统和遥感联合科技攻关计划,强调地理信息系统的实用化、集成化和工程化,使地理信息系统从初步发展时期的研究实验、局部应用走向实用化和产业化,为国民经济重大问题提供分析和决策依据。同时努力实现基础环境数据库的建设,推进国产软件系统的实用化、遥感和地理信息系统技术的一体化。这一阶段经营地理信息系统业务的公司逐渐增多,投入不断增加,政府部门的扶持力度有很大程度的提高。

11.2　地理空间与空间数据

11.2.1　空间和地理空间

“空间”(Space)的概念在不同的学科有不同的解释。从物理学的角度看,空间就是指宇宙在三个相互垂直的方向上所具有的广延性。从天文学的角度看,空间就是指时空连续体系的一部分。在地理学上,空间指的是地理空间(Geographic Space),它是指物质、能量、信息的存在形式在形态、结构过程、功能关系上的分布方式、格局及其在时间上的延续。

地理空间是地球上大气圈、水圈、生物圈、岩石圈和土壤圈交互作用的区域。地球上最复杂的物理、化学、生物和生物地球化学等过程都发生在地理空间中。因此,地理空间是人类活动频繁发生的区域,是人地关系中最为复杂、紧密的区域。

GIS 中的空间概念常用“地理空间”(Geo-Spatial)来表述,是指经过投影变换后,在笛卡尔坐标系(由一个固定的、特殊的点为原点,一对相互垂直且经过原点的线为坐标轴)中的地球表层特征空间。它是定义在地球表层目标集上的关系,即地理世界以实体为单位进行组织,将客观世界作为一个整体看待,每一个实体不仅具有空间位置属性和空间上的联系,更重要的是它与其他实体还具有逻辑上的语义联系,它还具有时间属性。一般来说,地理空间被定义为绝对空间和相对空间两种形式。绝对空间是具有属性描述的空间位置集合,它由一系列不同位置坐标值组成;相对空间是具有空间属性特征的实体集合,它由不同实体之间的空间关系构成。

GIS 中的地理空间一般包括地理空间定位框架及其所联结的地理空间特征实体。

地理空间定位框架即大地测量控制,由平面控制网和高程控制网组成。大地测量控制为建立所有地理数据的坐标位置提供了通用参考系,将所有地理要素与平面及高程坐标系相连接。大地测量控制信息的主要要素就是大地测量控制点,这些坐标点的平面位置和高程被精确地测量。

地理空间特征实体表示地理空间信息的几何形态、时空分布规律

及其相互之间的关系，是指具有形状、属性和时序性的空间对象或地理实体，包括点、线、面、曲面和体，它们构成地球圈层间复杂的地理综合体，也是 GIS 表示和建库的主要对象。

地理空间数据就是以地球表面作为基本定位框架的空间数据。GIS 提供了对地理空间数据进行分析和将地理空间数据实现可视化的机制。

由于计算机中处理和操作的数据是离散数据，在 GIS 中，地理空间数据是进行离散化表达的空间数据。

11.2.2 空间数据的特点

GIS 中常把地理空间数据称为空间数据。空间数据(Spatial Data)是指用来描述空间实体的位置、形状、大小及其分布特征诸多方面信息的数据，以表示地球表层一定范围的地理事物及其关系。

空间实体是空间数据中不可再分的最小单元，是对存在于这个自然世界中地理实体的抽象，主要包括点、线、面、体等基本类型。如把一个墓葬抽象成为一个点，它具有所处的位置、随葬品、葬俗等相关信息；把一段古城墙抽象为一条线，它具有所处的位置、起点、终点、长度、宽度等相关信息；把一座古城遗址抽象为一个面，它具有所处的位置、面积、使用年代、建筑布局等相关信息。

GIS 中的空间数据代表着现实世界的地理实体或现象在信息世界中的映射，它反映的特征应该包括自然界地理实体向人类传递的基本信息。空间数据描述的是所有呈现二维、三维甚至多维分布的关于区域的现象，它不仅包括表示实体本身的空间位置及形态信息，而且还包括表示实体属性和空间关系的信息，具有空间性、专题性和时间性。

1. 空间性是空间信息的最主要特性，是区别于其他信息的一个显著的标志。

空间性表示了空间实体的位置或所处的地理位置、空间实体几何特征，等等，从而形成了空间物体的位置、形态以及由此产生的一系列特性。空间性不但要求进行空间物体的位置和形态的分析处理，同时还要求进行空间相互关系的分析处理。

2. 专题性是指在一个坐标位置上地理信息具有专题属性信息。例如，在一个地面点上，可取得遗迹、遗物、古环境、古地貌等多种专题信息。

属性是空间数据中的重要数据成分,它同空间数据相结合,才能表达空间实体的全貌。GIS 中的专题属性常用表格和图像等方式来表达。

3. 空间和时间是客观事物存在的形式,两者往往是紧密互联的。空间数据的时间性是指空间数据的空间特征和属性特征随时间变化的动态变化特征,即时序特性。它们可以同时随时间变化,也可以分别独立随时间变化,如在不同的时间,空间位置不变,但属性数据可能发生变化或者相反。

空间数据的时间性反映了空间数据的动态性。在空间数据表示中,如果加上时间轴将会大大增加空间数据处理的难度,现有的大量 GIS 系统,常在空间属性中加注时间标注,以表示空间数据的时间性,也就是将时间特征隐含在数据中,因此,也称静态 GIS 系统,而将加上时间轴的 GIS 称为时态 GIS。

总之,空间数据的特征可以概括为空间特征和属性特征,其中空间特征数据包括地理实体或现象的定位数据和空间关系数据,属性特征数据包括地理实体或现象的专题属性(名称、分类、数量等)数据和时间数据,而空间特征数据和属性特征数据统称为空间数据,在 GIS 中指的实质上是地理空间数据。

11.2.3 空间数据的类型

GIS 中包含有大量的数据,基本上可以分为以下五种类型:

1. 地图数据:来源于各种类型的普通地图和专题地图,这些地图的内容丰富,图上实体间的空间关系直观,实体的类别或属性清晰,具有很高的精度。

2. 影像数据:主要来源于卫星遥感和航空遥感,包括多平台、多层面、多种传感器、多时相、多光谱、多角度和多种分辨率的遥感影像数据,构成多源海量数据,也是 GIS 的最有效的数据源之一。

3. 地形数据:来源于地形等高线图的数字化,已建立的数字高程模型和其他实测的地形数据等。

4. 属性数据:来源于各类调查报告、实测数据、文献资料、解译信息等。

5. 元数据:关于数据的数据,例如数据来源、数据权属、数据产生的时间、数据精度、数据分辨率、源数据比例尺、数据转换方法等。

11.2.4 空间数据的结构

空间数据主要通过矢量方式和栅格方式进行表达，分别形成了栅格数据结构和矢量数据结构（图 11.1）。矢量表达法集中了地理实体的形状特征以及不同实体之间的空间关系分布，栅格表达法则描述了地理实体的级别分布特征及其位置。

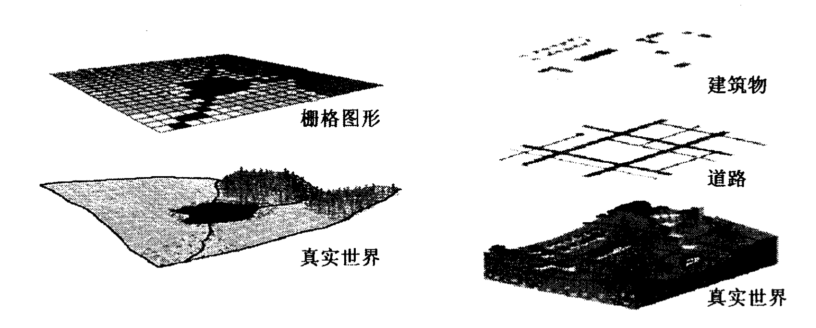


图 11.1 栅格数据与矢量数据模型

11.2.4.1 矢量数据模型

矢量数据模型是用离散的点、线（或称“弧”）、面（或称“多边形”）来表示和描述连续地理空间中的实体。由于面（多边形）是线（弧）所围成的区域，线（弧）又是点的有向序列，其空间位置由所在坐标参考系中的坐标定义，所以，坐标点是矢量数据模型最基本的数据元素。

从理论上说，矢量数据描述的是连续空间，因而它能精确地表达地理实体的形状与位置，又可以通过点、线、面三种基本图元之间的联系，构筑地理实体及其图形表示的邻接、连通、包含等拓扑关系，从而有利于地理信息的查询、网络路径优化、空间相互关系分析等地理应用。

GIS 的矢量数据模型可以用相对较少的数据量，记录大量的地理信息，而且精度高，制图效果好。

11.2.4.2 栅格数据模型

栅格数据是用离散的量化的格网值来表示和描述空间实体，是用数字表示的像元阵列。栅格数据结构将空间规则地划分为栅格（通常为正方形），栅格的行和列规定了实体所在的坐标空间，而数字矩阵本身则描述了实体的属性或属性编码。

栅格数据最显著的特点就是存在着最小的、不能再分的栅格单元，

栅格的大小代表空间分辨能力。栅格数据在形式上通常表现为整齐的数字矩阵,且便于计算机进行处理,特别是存储和显示。

11.2.5 地形图的矢量化

考古调查和发掘中都会产生大量的图形,古代聚落的位置、范围等内容都标注在1:5万或1:1万等比例尺的地形图中。所以首先需要对这些地形图进行数字化,以便在计算机中对地形图数据进行处理,建立考古GIS数据库,实现空间分析功能。

扫描数字化可以将图形、图像(如线划地形图、黑白或彩色的遥感影像等)快速、高精度地扫描数字化后输入计算机,经图像处理软件分析和人机交互编辑后,生成可供使用的图形数据。扫描数字化的自动化程度高,操作人员的劳动强度小,数字化的速度快、精度高、操作简便。目前地形图扫描数字化的软件已经非常成熟,扫描数字化已成为地形图数字化的主流技术,能够将扫描的图形进行分层矢量化,在信息化工作中发挥了重要的作用,得到了广泛的应用。

地形图扫描到计算机中之后,需要根据地形图上的坐标格网对图幅进行纠正,减少扫描误差的影响。纠正时选择图幅四个角点和中部的一些坐标格网交叉点。其中坐标格网交叉点的坐标值直接从地形图上读取,四个角点的坐标根据相关软件计算,然后在ENVI等软件中进行纠正。

彩色图形需要进行色彩调整,使其满足数字栅格图对色彩的要求,实现16色彩色模式,使等高线、水系等同一类线条分别以单一色彩表示,便于计算机自动或半自动跟踪(彩图6)。这一处理过程可以在Photoshop软件中得以实现,首先将扫描后的RGB图像模式转换成256色索引颜色模式,然后通过魔棒工具,设定合适的容差数值,选择某一种颜色的线条,再运用“编辑”菜单中的“填充”功能,将被选择的部分以一种颜色替代。如此多次才可以将某一种要素的线条以单色显示。

全自动跟踪矢量化是软件自动将图幅内的全部线条进行矢量化,非常快捷,但是矢量化后往往产生很多零碎的线条,凌乱不堪,需要花费更多的时间去修整,一般不便采用。半自动跟踪矢量化是操作员使用鼠标指定要矢量化的线条,软件会自动进行跟踪,遇到交叉点或线条断开时停止,需要操作员指定下一步应该跟踪的线条位置。每一类地物要素作为一个图层,一个图层跟踪结束后,再跟踪另一个图层。

地形数据主要来自地形图中数字化的等高线,其中计曲线、首曲线、间曲线等都分成不同的类别,给予不同的代码进行矢量化,同时对每根等高线赋予高程数值。半自动跟踪过程中,需要根据等高线的特性,处理好等高线与山脊线、山谷线(河流)之间的关系。等高线之间不能有交叉,遇到陡坎、陡坡时,可以只跟踪出陡坎、陡坡之上、之下的等高线,中间的等高线断开。等高线与山脊线、山谷线(河道)应该相互正交。地形图中冲沟、河床等处有时没有绘制等高线,应该根据标注的高程点等相关信息,确定等高线大致的位置(彩图7)。

考古GIS项目中,一般只将水系、道路、居民地等地物要素进行矢量化,单独分层处理。水系中的面水系与线水系、道路中的铁路与各种等级的公路、居民地中的楼层数量等等,也都可以通过不同的属性值加以区别,以便在后续的分析中能够充分发挥GIS技术的强大功能优势。考古遗址的位置、范围等信息可以在矢量化时作为独立的一个图层,或根据遗址年代的不同分成几个图层。

各要素全部矢量化完毕之后,检查线条是否有遗漏、是否有违背等高线特性的地方、等高线高程数值是否正确,以及进行坐标配准、坐标系转换(3°或6°带)、地形图接边处理等等。笔者一般使用GEOWAY 3.5软件进行地形图数字化,矢量化完毕再指定标准的图幅名称、比例尺和地形图中四个角点的位置,就可以将数字化的各要素在1954年北京坐标系或1980西安坐标系中进行配准。如果使用其他软件进行矢量化,可以根据坐标格网上的坐标数值,对矢量化后的数据进行纠正和配准。

进行3°投影带与6°投影带之间的数据转换,可以使同一研究区域中1:1万(3°投影带)与1:5万(6°投影带)地形图中的要素统一在同一个的坐标系中,转换时需要指定转换后投影带的带号。有的时候研究区域正好跨两个投影带,则需要将其中一个投影带中的地形图数据转换到另外一个投影带之中,这样相邻投影带中的图幅才能够相互拼接。

最后将全部数据输出成AutoCAD的DXF格式文件,如有可能最好直接转换为地理信息系统等软件可以直接调用的SHP等格式文件。

11.3 空间分析技术

空间分析是 GIS 的重要功能,是 GIS 区别于一般信息系统的关键特征,更是评价 GIS 系统性能的一项主要指标。空间分析是基于地理对象的位置和形态特征的空间数据分析技术,其目的在于提取和传输空间信息。在 GIS 技术应用研究中,需要根据已有空间数据的特征,运用 GIS 软件的特殊原理和算法,生成多种空间数据模型,充分展示数据之间的联系及其变化特征,对空间数据进行操作、处理、分析、模拟和决策。

由于 GIS 空间数据库中存储了包含空间特征的空间信息以及与应用相关的专题信息,因此 GIS 空间分析包含空间数据的空间特征分析、非空间特征分析以及空间特征和非空间特征的联合分析。

空间特征分析从空间物体的位置、关系等方面去研究空间事物,最后对空间事物做出定量的空间描述和分析,考古 GIS 中能够对古代聚落分布或典型器物的分布、形态、演变等进行研究。

非空间特征分析主要是对空间物体和现象的分析,主要通过数学(统计)模型来描述和模拟空间现象的过程和规律。这类分析主要采用统计分析方法,尤其是多元统计分析方法,如主成分分析、聚类分析、相关分析、趋势面分析等。分析过程中不考虑数据抽样点的空间位置,但由于空间特征数据和非空间特征数据间存在着对应关系,其结果同样能够反映空间现象和规律。

空间特征和非空间特征的联合分析在实际中大量使用,通常是通过空间特征分析获得空间位置信息,然后再根据非空间特征分析获取区域内的专题信息。

总之,空间分析通过对空间数据的分析处理,获取地理对象的空间位置、分布、形态、演变等新信息。空间分析的对象是空间数据,这些数据具有空间位置、空间关系、时序性、多尺度、多维性和海量数据等特点。空间分析不仅需要考虑空间实体位置、属性特征,还要关心空间实体间的拓扑关系、空间分布组合、距离和方位、空间交互,这样才能刻划空间数据的分布模式,探索和模拟各种分布模式的关系,以提高对空间实体的预测和控制水平。

GIS 系统提供的空间分析方法很多,各类系统提供的分析能力的

差异性也很大。但目前的 GIS 系统基本上都具备查询检索分析、空间形态分析、地形分析、叠置分析、邻域分析、网络分析、图像分析、空间统计分析等功能。有时也需要在 GIS 支持下,通过建立一定的数学模型实现地理现象的分析和模拟,深化 GIS 技术的应用程度。

11.3.1　空间数据量算

GIS 软件都能够进行长度、面积和体积量算。矢量数据中可以根据点位坐标计算两点之间的直线距离,能够基于梯形面积公式的计算方法解算多边形的面积。栅格数据的长度计算分四邻域方向长度计算和八邻域方向长度计算,四方向长度计算根据相邻栅格单元在水平和垂直方向的距离来计算,八方向长度计算根据相邻栅格单元在 8 个方向的距离来计算。栅格数据的面积计算实质是统计多边形中栅格的数目。

空间数据的量算能够统计古代聚落、古城遗址等的面积,以及考古遗迹之间的距离、考古发掘的土方量,等等。

11.3.2　空间数据查询

空间数据查询是 GIS 最基本的功能,它是 GIS 高层次空间分析的基础,也是 GIS 面向用户的直接窗口。空间数据的查询要求交互式进行,其结果通过两个视窗把空间数据和属性数据同时进行显示。空间数据查询的实质是找出满足属性约束条件或空间约束条件的地理对象。因此,它既要便于用户选取空间数据,又要以可视化方式显示空间数据。在 GIS 中,用户的很多问题可通过查询解决,查询还能派生新数据。

从空间数据特性及其使用的角度将其分为基于属性特征的查询、基于空间特征的查询和基于空间特征和属性特征的联合查询。

11.3.2.1　基于属性特征的查询

基于属性特征的空间查询是通过给出属性约束条件,找出满足约束条件的地理对象,然后通过 GIS 系统进行空间定位。这类查询,从内部过程看,属于"属性到图的查询"。查询的实质是基于常规关系数据库的查询,所用查询方法通常由标准的 SQL 实现,然后,按照属性数据和空间数据的对应关系显示图形。

目前 GIS 系统都采用标准的 SQL 查询,通常 GIS 系统为用户提供

SQL 查询对话框，以帮助用户输入查找条件。当从对话框输入查询条件后，系统进行语法错误检查，如有错误，必须进行修正后方可继续操作，直到语法检查正确，经确认输出查询结果。

11.3.2.2 基于空间特征的查询

空间性是空间数据的主要特征，空间特征的查询通常指以图形、图像或符号为语言元素的可视化查询。从查询的内部过程看，是属于“图到属性的查询”，这种查询首先借助于空间索引在空间数据库中找出空间地理对象，然后，再根据 GIS 中属性数据和空间数据的对应关系找出并显示地理对象的属性，并可进一步进行相关的统计分析（图 11.2）。空间特征的查询可分为：

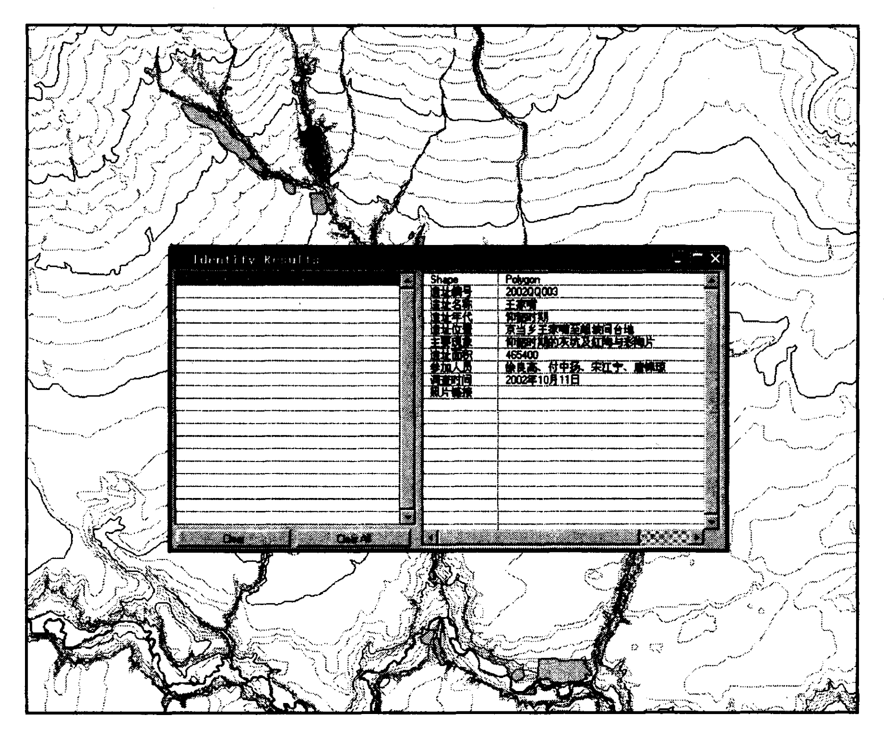


图 11.2 聚落属性的查询

空间几何数据查询：主要根据空间目标的几何数据，分析计算不同地物（如线状地物）的长度、组成、坐标点数及面状地物的面积、周长等。

空间位置查询：空间查询中最基本的查询功能，只要空间数据是同大地坐标进行了配准的，简单地点击空间点状地物，就可获取坐标点地

理位置;点击线状地物,就可获取该线的长度及地理位置;点击面状地物,就可获取该面的周长、面积及其地理位置等。

空间关系查询:空间关系查询主要指拓扑关系查询。这类查询可以包括同类要素间的邻接性查询、连通性查询、包含性查询、重合性查询、方向性查询等,以及不同类要素间的关联性查询、穿越性查询、落入性查询、方向性查询等。

当然,实际上进行空间关系查询时,不总是局限于某一查询功能,常需要多种查询联合起来才能完成某种查询功能。

11.3.2.3 基于空间特征和属性特征的联合查询

空间特征和属性特征的联合查询不是简单地通过定位空间特性查询结果,显示相关的属性;也不是从属性特征的查询结果,显示相关的空间位置。空间特征和属性特征联合查询的实质是指查询条件中同时涉及空间特征和属性特征。

11.3.3 叠置分析

11.3.3.1 叠置分析概述

空间数据叠置分析是 GIS 的重要功能,它以空间层次分析理论为基础,而空间层次分析理论的发展又与空间叠置分析的应用直接相关。

空间数据的叠置在图间进行,被叠置的图必须是同一地区、同一比例尺、同一投影方式,且各图均已进行了配准。彩图 8 是将遥感影像、等高线、水系和聚落分布等图层进行了叠置。

空间数据的叠置是将两幅或多幅专题图重叠在一起,以生成新图和对应的属性。叠置分析既能对存在的不同类型信息进行综合分析,又能通过图形叠置获取新信息。例如将某一时期的聚落分布与水系进行叠置,得到聚落分布与水系关系图。

根据叠置方式不同,可以分视觉叠置、信息复合叠置。视觉叠置不改变参加叠置的空间数据结构,也不形成新的空间数据,只给用户带来视觉效果。信息复合叠置不仅要产生视觉效果,还要对参加叠置的多种空间数据进行重新组合,从而形成新的目标,产生新的图层。

根据叠置对象的不同,叠置分析可分为点和面的叠置、线和面的叠置、面和面的叠置、线和线的叠置、点和点的叠置及点和线的叠置。

按叠置采用的数据结构可分为矢量叠置和栅格叠置。矢量叠置实质上是实现拓扑叠置,叠置后得到新的空间特性关系和非空间属性。

栅格叠置能够得到新的栅格图，而在栅格叠置时，尤其是当叠加要素较多时，可能产生很多组合，其数量可能很大，使用户无法接受。这时需要在叠置前或叠置后进行聚合或聚类处理。

按叠置功能可分为类型合成叠置、统计叠置、信息提取叠置。类型合成叠置是通过对两幅图进行交、并、差等叠置运算，求出交集、并集、差集；统计叠置是通过叠置统计出一种要素在另一种要素的某个区域内的分布状况和数量特征；信息提取叠置是通过建立几何图形，如圆、矩形、条带、不规则多边形等图形和被叠置信息进行叠置，以提取圆、矩形、条带、不规则多边形内包含的图形信息。

11.3.3.2 基于矢量数据的叠置分析

GIS 中数据叠置分析既可用矢量数据结构，也可用栅格数据结构，两者都能得到空间数据的新集合。以面状地物的叠置为例，矢量数据叠置得到的是新的多边形，栅格数据叠置得到的是新的数据集合。被叠置的对象都是指同一地区、同一比例尺的两组或两组以上的图层。

矢量数据叠置中常用的有统计叠置和类型合成叠置两种方式。

统计叠置不对叠置图件做分割和合并等位置分析，它的目的是精确地计算一种要素在另一种要素的某个区域多边形内的分布状况和数量特征，或者是通过叠置，统计某个区域范围内某种专题内容的数据，并输出统计报表或列表。例如，统计一个重要聚落周围 5 公里范围内其他聚落的分布情况，并将统计结果通过图形和表格显示出来。

类型合成叠置实质上是拓扑叠置，这时需要对被叠置图做全面的空间叠置分析。类型合成叠置的目的是通过区域多重属性的模拟，寻找和确定同时具有几种地理属性的分布区域，或者按照确定的地理指标，对叠置后产生的具有不同属性级的多边形进行重新分类或分级。

类型合成叠置会形成新的多边形。例如，根据研究区域内水系、坡度、聚落分布等要素，提取距离水系 600 米以内、坡度小于 3°、聚落周围 3 公里以内的区域。

实际应用中，类型合成叠置经常会产生一些细碎图斑，这类图斑通常没有什么意义，可通过删除面积小于某一阈值的多边形，予以剔除。

11.3.3.3 基于栅格数据的叠置分析

栅格数据叠置操作比较简单，概念清楚，但数据量大、精度较低。栅格数据叠置的实质是在确定叠置操作的逻辑表达式后，计算栅格矩阵数据中每个像元的逻辑交、并、差运算及其组合运算，最后将每个栅

格值赋予运算的结果,得到结果栅格矩阵。

栅格图层叠加的形式一般是二值逻辑叠加,常作为栅格结构的数据库查询工具,通常分为两步:首先,为每个条件创建一个新图层,通常是二值图层,1 代表符合条件,0 表示所有不符合条件。其次,进行二值逻辑叠加操作得到想查询的结果。

11.3.4 邻域分析

邻域分析是通过空间点周围的邻近点或某特定位置及方向范围内的邻近区域进行分析的一种方法,强调邻域几何分析,常见的有缓冲区分析和泰森多边形分析。

11.3.4.1 缓冲区分析

缓冲区分析(Buffer Analysis)是解决邻近度问题的分析工具,也是GIS 中基本的空间分析工具。缓冲区是指 GIS 中基本空间要素点、线、面实体周围建立的具有一定宽度的邻近区域。从数据的角度看,缓冲区是给定空间对象的邻域,可以用邻近度描述地理空间中两个地物距离相近的程度。如聚落考古研究中,建立线状河流、点状或多边形聚落的缓冲区,然后再进行分析和研究。

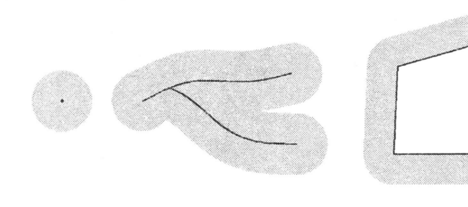
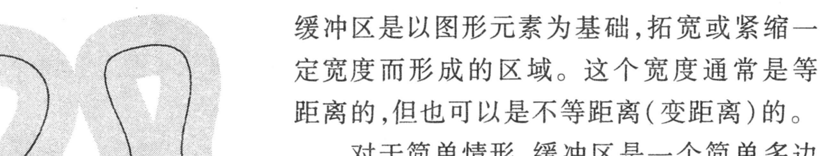


图 11.3 点、线和多边形的缓冲区

缓冲区分点缓冲区、线缓冲区、面(多边形)缓冲区(图 11.3)。其中多边形的缓冲区也可以向内拓展。

建立缓冲区是进行缓冲区分析的基础,缓冲区是以图形元素为基础,拓宽或紧缩一定宽度而形成的区域。这个宽度通常是等距离的,但也可以是不等距离(变距离)的。



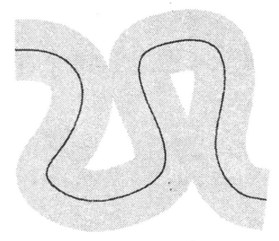


图 11.4 边界相交的缓冲区

对于简单情形,缓冲区是一个简单多边形,但当计算形状比较复杂的对象或多个对象集合的缓冲区时,就复杂得多。为使缓冲区算法适应更为普遍的情况,就不得不处理边线自相交的情况。当轴线的弯曲空间不容许缓冲区的边线无重叠地通过时,就会产生若干个自相交多边形

(图 11.4)。

从缓冲区分析的角度看,建立缓冲区不是最终目的,单纯的建立缓冲区一般没有实际意义,只有将建立的缓冲区同 GIS 中其他分析功能结合起来,才能实现缓冲区分析功能。

缓冲区建立之后,便可以对缓冲区内空间信息形态、特性、分布作进一步分析。缓冲区分析常涉及叠置分析,如聚落考古研究中将河流缓冲区与聚落分布图进行叠置,研究聚落分布与河流缓冲区的关系(图 11.5)。

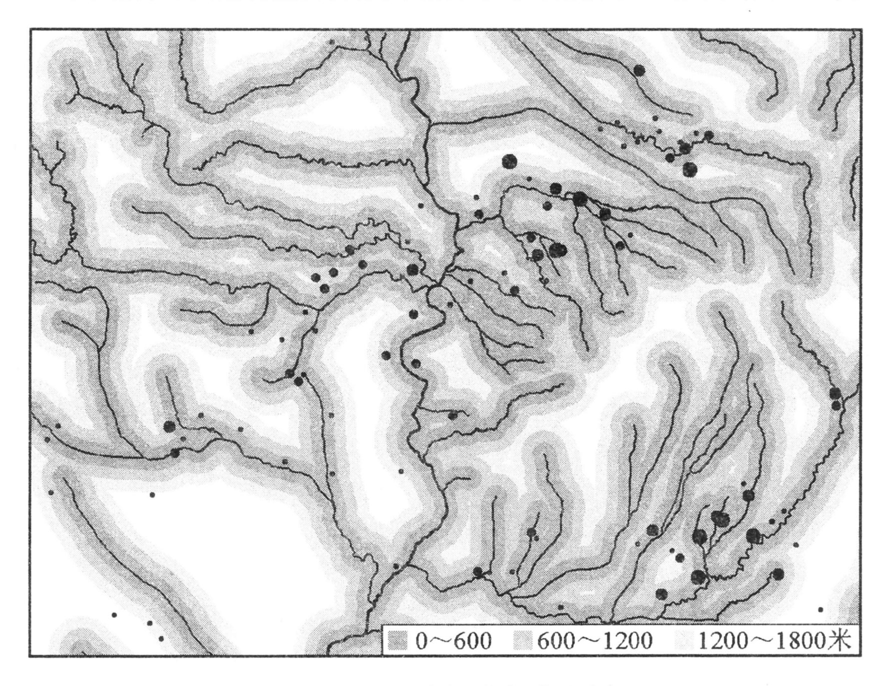


图 11.5　河流缓冲区与聚落分布图

缓冲区分析必须具备主体对象、邻近对象和对象的作用条件三个要素。主体对象主要指点、线、面对象,如上例中河流是主体对象。邻近对象是指受主体对象影响的客体,如上例子中聚落分布是受主体对象影响的客体。对象的作用条件是根据主体对象对邻近对象作用的不同,随距离变化而产生的典型模型,聚落分布于距离河流 600 米以内的区域,超过这一区域的聚落极其稀少。

基于栅格数据结构也可以作缓冲区分析,通常称为推移或扩散(Spread)。推移或扩散实际上是模拟主体对邻近对象的作用过程,物

体在主体的作用下在一阻力表面移动，离主体越远作用力越弱。

11.3.4.2 泰森多边形分析

泰森多边形(Thissen Polygen)分析是由荷兰气象学家 A. H. Thiesen 提出的一种空间分析方法，最初用于从离散分布气象站的降雨量数据中计算平均降雨量。

泰森多边形由一批具有一定分布的离散样本点数据生成，该多边形的边界确定了受离散样本点影响最明显的最小区域，该区域的属性可用此样本点数据属性表示。

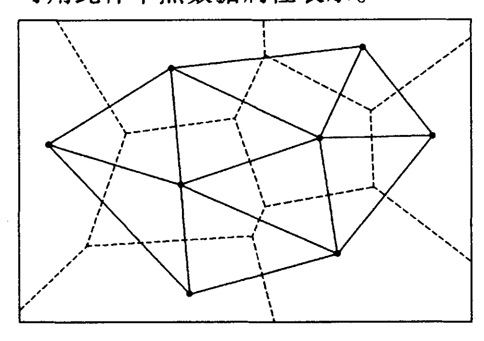


图 11.6 泰森多边形的结构

泰森多边形可作为一种分割空间区域的方法而使用。在泰森多边形内的任意点到本多边形中心点的距离，小于该点到任何其他多边形中心点的距离。因此它也可以看作空间区域数据的一种插值方法，即对空间一个未知点的值可以用离它最近的已知点的值来表示。传统的泰森多边形结构是首先生成 Delaunay 三角网，这种三角网特点是任何一个三角形外接圆内不能包含任何其他离散数据点(图 11.6 的实线)。然后在 Delaunay 三角网中每个三角形两个顶点连线的中点作垂线，相互邻近的垂线相交形成多边形区域，或者说三角形各边的垂直平分线相交生成多边形(图 11.6 中的虚线)。

多个互不重叠的离散数据点生成的泰森多边形具有如下特性：

1. 每个泰森多边形内只包含一个离散数据点；

2. 泰森多边形内的任意点同该多边形包含的离散数据点间距离小于它同任何其他离散数据点间的距离；

3. 泰森多边形的任意一个顶点必有 3 条边同它连接，这些边是相邻 3 个泰森多边形的两两拼接的公共边；

4. 泰森多边形的任意一个顶点周围有 3 个离散数据点，将其连成三角形后，该三角形的外接圆圆心即为该顶点。

泰森多边形可根据样本点的位置分布，自动生成以样本点为中心的等值区，使样本点属性数据扩展为区域的面状属性数据，这在地学领

域中有重要的实用价值。实际工作中,很多地学特性因受条件限制,不可能直接获得面域数据,而常采用具有代表性的样本点数据来估算。但选择离散数据点应使离散数据点有相当的数量,同时保证所选的离散数据点具有典型性和代表性。

泰森多边形分析的应用范围很广,一些考古界学者通过泰森多边形来研究古代聚落形态特征,探究聚落分布与环境资源的空间关系,认为在一个典型地域中,各聚落的活动范围主要集中在其泰森多边形内部。

11.3.5 空间网络分析

空间网络分析是对地理网络进行地理分析和模型化。由于网络分析以线状模式为基础,通常用矢量数据结构来实现空间网络分析。

这里所说的网络,不是指计算机网络,而是由一组线状要素相互联结形成的网状结构。从数学的角度看,网络分析的理论基础是图论。GIS 将图论中的网络概念引入到地理空间中,来表达和描述基于网络的地理目标,从而形成了地理网络的概念。从数据结构的角度,网络分析的基础是非线性图数据结构。

网络分析的实质是通过研究网络的状态,模拟和分析资源在网络上的流动和分配,以实现网络上资源的优化。在解决城市交通规划、城市管线设计、医疗机构设施的布点、救援行动路线的选择等方面,有着广泛的应用。考古研究中也有学者通过网络分析,研究聚落周围人类获取资源以及资源沿水系等网络流动的情况。

地理网络中很多地理目标还具有层次复合的意义,通常用线状目标及其附属的点状目标表示一系列线状设施和点状设施。其中,线状特征是构成地理网络的基础。但进行地理网络分析时,必须考虑整体网络的功能和关系。

空间网络分析包含的内容很丰富,其应用领域正在日益拓宽。主要包括路径分析、定位与配置分析、连通分析和流分析。

11.3.5.1 路径分析

路径分析(Path Analysis)在空间网络分析中占有十分重要的位置,网络分析的典型应用是求最短路径问题。最短路径分析是根据网络的拓扑性质,在网络图中求结点之间有无路径、求从一个结点出发到其他各结点之间的最短路径,或求每对结点之间的最短路径。实际使

用中最短路径分析不一定是距离,也可以定义为两点间所用时间、所付运费、物流量等。

最佳路径实质上是求加权后的最短路径。例如,在交通运输中两个地点之间的最短路径,不一定是最佳路径,因为道路可能有上坡、下坡、路面质量、道路拥挤度等因素。为此,可对两点之间赋予权重,以表示两点之间的有效距离。

11.3.5.2 定位与配置分析

定位与配置分析(Location-Allocation Analysis)是通过对需求源和供应点的分析,实现网络设施的最优布局,并对一个或多个中心点资源在网络上的最优分配问题进行模拟。

定位问题是指已知需求源的分布,确定在何处设置供应点最好。配置问题是确定需求源分别由哪些供应点提供,即已设定供应点,求需求配置点。定位与配置是指同时解决需求分配点和供应点两个问题。

定位与配置问题涉及因素多,如问题的空间类型、规划的时间范围、公共设施的服务方式、需求点的分配类型等。定位与配置问题必须建立一系列边界条件,并要确定多个目标函数。边界条件指规划的条件,用来作为问题解决的约束条件,如要求所有需求点都有相应的供应点。目标函数给出最大值或最小值,以获得一个明确的分析结果。

考古研究中,空间配置将聚落与地域进行关联,使 GIS 支持的地域特性和人类行为关系的研究成为可能。

11.3.5.3 连通分析

寻求从一个结点出发,可到达的全部结点或网线,其中最少费用的连通问题是连通分析中的特定问题。

11.3.5.4 流分析

用来寻求资源从一个地点出发,运到另一个地点的最优化方案,优化标准包括时间最少、费用最低、路程最短、资源流量最大等。

11.3.6 空间密度分析

空间密度分析是根据要素的数据集计算整个区域的数据聚集状况,从而产生一个连续的密度表面。密度分析主要是基于点要素进行的,以每个待计算的格网点为中心,进行圆形区域搜寻,计算每个格网点的密度值。

密度分析本质上是一个通过离散采样点进行表面内插的过程，根据内插原理的不同，分为核函数密度分析（Kernal）和简单密度分析（Simple）两种情况，具体操作中一般会有两种选项可供选择。

核函数密度分析中，落入搜索区内的点具有不同的权重，靠近格网搜寻区域中心的点会被赋以较大的权重，随着其与格网中心距离的增加，权重降低。权重数值一般存放于属性表的一个字段中。这种计算结果分布较平滑。

简单密度分析中，落在搜索区内的点具有相同的权重，需要先对其进行求和，再除以搜索区域的大小，从而得到每个点的密度值。

考古研究中有学者对聚落的分布进行空间密度分析，研究聚落分布的密度与环境特征的关系。由于不同聚落的面积往往悬殊很大，所以根据聚落的数目进行简单密度分析显得不是很合理，应该考虑聚落面积差异等情况，并由此设置权重大小。另外，考古发现的典型器物、特殊材料等的空间密度分析可能具有一定的意义。

11.3.7 空间统计分析

空间数据之间存在着许多相关性和内在联系，为了找出空间数据之间的主要特征和关系，需要对空间数据进行分类和评价，即进行空间统计分析。通常用户可以根据不同的使用目的，选择 GIS 中存储的数据，运用适当的统计方法，获得所需信息。空间统计分析在考古学研究中也有广泛的应用，人骨测量数据、陶器与金属器物的成分等数据都可进行统计分析，为体质人类学研究、陶器与金属器物产地研究、器物流通线路研究等提供了强有力的支持。

11.3.7.1 主成分分析

主成分分析是一种将原来多个指标化为少数几个相互独立的综合指标的一种统计方法。在地理问题中，经常要研究多个并相互关联的自然和社会要素，由于变量个数太多，并且彼此之间存在着一定的相关性，因而使得所观测到的数据反映的信息在一定程度上有所重叠。而且当变量较多时，在高维空间中研究样本的分布规律比较复杂，势必增加分析问题的复杂性。人们自然希望用较少的综合变量来代替原来较多的变量，当然，这较少的几个变量要尽可能多地反映原来变量的信息，并且彼此之间互不相关。主成分分析主要用于简化数据结构，寻找综合因子，运用综合因子进行样本排序及分类等。

11.3.7.2 层次分析

层次分析是把相互关联的要素按隶属关系划分为若干层次，由专家们将各层次各要素的相对重要性数量化，并用数学方法为分析、决策、预报或控制提供定量的依据。因子权重的确定是建立评价模型的重要步骤，权重正确与否极大地影响评价模型的正确性，而通常的因子权重确定具有较多的主观性。层次分析法是利用数学方法，综合众人的意见，科学地确定各影响因子权重的简单而有效的数学手段。

11.3.7.3 聚类分析

聚类分析通过直接比较各事物之间的性质，将性质相近的归为一类，将性质差别较大的归入不同类别。聚类分析事先并不知道研究对象应分为几类，更不知道观测到的个体的具体分类情况，目的是通过对观测数据所进行的分析处理，选定一种度量个体接近程度的统计量、确定分类数目、建立一种分类方法，并按接近程度对观测对象给出合理的分类。

11.3.7.4 判别分析

判别分析是判断样品所属类型的一种统计方法。与聚类分析不同的是，判别分析已经有了一个明确的分类标准。判别分析的特点是事先已有“类”的划分，对给定的新样本，判断它来自哪一“类”。在进行判别分类时，由于假设的前提、判别的依据及处理的手法不同，可得出不同的判别方法。如距离判别、Beyes 判别、Fisher 判别、逐步判别和序贯判别等。

11.3.8 空间变换

地理信息系统通常是按有一定意义的图层和相应的属性建立空间数据库的。为了满足特定空间分析的需要，对原始图层及其属性进行一系列的逻辑或代数运算，以产生新的具有特殊意义的地理图层及其属性，这个过程称为空间变换。空间变换可以基于单个图层进行，也可以针对多个图层。本节的空间变换将仅限于对单个图层的操作或计算，基于多图层的操作，则属于空间叠置分析的内容。

矢量结构中包含了大量的拓扑信息，数据组织复杂，使得空间变换十分繁琐。栅格结构简单、规则，空间变换比较容易。另外基于矢量结构的空间变换，对于单个图层意义不大，生成新图层时往往需要多个图层的信息，在多图层叠加分析中意义很大。

基于栅格结构的空间变换可分为单点变换、邻域变换和区域变换三种方式。

单点变换只考虑单个点的属性值进行运算，假定独立单元的变换不依赖于其邻点上属性的影响，也不受区域内一般特征的影响。单点变换最常见的函数有加、减、乘、除等代数运算，与、并、非、异、或等逻辑运算，大于、小于等比较运算，以及指数函数、对数函数、三角函数等。其得到的新图层可与原图层属性意义完全不同。

邻域变换是指在计算新图层图元值时，不仅考虑原始图层上相应图元本身的值，而且还要考虑与该图元有邻域关联的其他图元值的影响。这种关联可以是直接的几何关联，也可能是间接的几何关联。常见的函数有平滑、离散点搜索、连续表面描述（坡度、坡向、可视域分析）、点在多边形中的判断等。

区域变换是指在计算新图层属性值时，要考虑整个区域的属性值，即通过一个函数对某一区域内的所有值进行综合，然后计算新属性值。常见的函数有求区域平均值、极值、求和、归组、整体插值等方法。

11.3.9 再分类

地理信息系统中存储的很多数据都具有原始数据的性质，可以根据不同的需要对数据再进行分类和提取，找出有用的隐藏信息。由于这种分类是对原始数据进行的再次分类组织，因此称为再分类（Reclassification）。

地理信息系统能够对空间信息进行处理，同时也具有处理非空间属性的功能。使用主成分分析、层次分析、聚类分析、判别分析等经典的数理统计方法，可以根据考古研究中遗址的年代、文化内涵、使用情况等非空间属性，进行再分类，得到新的分类结果数据。这种分类属于普通的分类，没有改变地物已有的属性值，而只是根据地物的属性，将它们划分到相应的类别中。

点、线状地物的再分类，对于矢量数据结构可以通过简单的修改属性表中的数值来实现；对于栅格数据结构也可以通过修改属性值来获得新的点、线状地物。面状地物的再分类，对于栅格数据结构则和点、线分类一样，通过简单的改变属性数值并改变图例表现这一变化。对矢量数据结构的面状地物进行再分类，则需要同时改变实体的几何形状和属性。首要的任务是去掉将要合并的多边形之间的分界线（Line

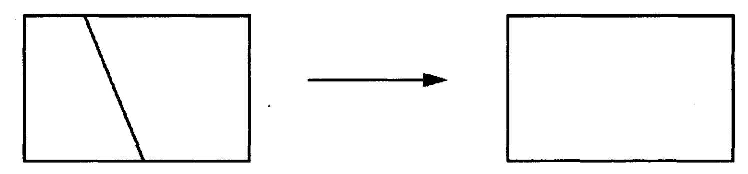


图 11.7 多边形的合并

Dissolve),再把这两个多边形的属性值变为同一属性(图 11.7)。

对面状地物再分类得到的新图层的类别比原图层少,是最常用和最简单的再分类。如果想把面状地物进一步分解成不同类别的地物,可使用另一个图层,通过多边形叠加方法来实现。这种再分类方法,只是根据面状地物本身的属性,通过重新改变属性值而实现分类的目的,当然也可以结合邻域范围的属性值进行再分类,如坡度计算、缓冲区计算。再分类还可以综合多个图层的属性信息。

11.4 GIS 与考古学研究

伴随着 GIS 技术的不断发展,考古研究中 GIS 技术的应用与研究也得到了足够的重视,并且取得了丰硕的成果,为现代考古学研究提供了一整套全新的方法和手段,成为考古学研究中一个独特的研究方向。很多定期召开的考古界国际学术研讨会(如 CAA,即 Computing Applications in Archaeology, Archaeometry 以及一些考古学研究方面的年会等)都将 GIS 作为独立的专题,让考古界的学者与 GIS 方面的专业人员一起进行交流和探讨,更加促进了考古研究中 GIS 技术的发展与理论的成熟。

11.4.1 考古研究中应用 GIS 的必要性

在考古学研究中应用 GIS 技术之前,考古调查和发掘中发现的各种遗迹或遗物的时空分布情况,都要记录在遗迹分布图上,这些是研究古代社会经济、文化和社会形态的重要依据。一个考古遗址的发掘,往往需要进行若干次阶段性发掘才能完成,因此就遗址的发掘和研究来说,又具有一定的长期性,而且每次发掘的内容都应该及时补充到遗迹分布图中,这样才有利于考古研究的顺利进行。所以遗址的发掘资料除了发掘记录外,通常是每次田野工作结束时,在现有地图或实测图上

进行补充和修正新的遗迹或现象，于是一个遗址的资料就会逐渐增多。在这样的情况下，对一个遗址内大量而重要的资料进行查询、管理和综合研究时往往会显得非常麻烦，而且很难将大量的资料综合在一起进行定性定量研究和三维空间的模拟分析，资料的利用率很低。所以在20世纪80年代末，欧美考古学研究中开始引入了地理信息系统技术，很好地解决上述的那些问题。

考古调查和发掘中获得的资料都具有空间属性，一个考古遗址的位置和范围可以使用空间数据来表示。考古遗址内的遗迹、现象乃至一件器物或陶片都处于特定探方中的特定位置上，可以用准确的数据来表示各自的空间位置，考古学研究就是通过各种遗迹和器物及其空间分布的状况，来模拟和重建当时的历史及其演变过程。传统的考古学研究方法往往只是通过人脑的思考，然后使用文字给予一定的描述，对研究结果进行归纳和总结。这种研究方法非常简便，但是往往无法同时运用全部的考古信息进行综合研究，而且不便于进行空间分析和模拟，深入浅出地对考古学问题进行阐述和研究。地理信息系统技术正是从考古遗迹或现象的空间位置出发，建立多种空间信息与属性信息并存的数据库和图形图像库，从而能够方便地进行分层或综合显示、查询、模拟各类数据信息，直观、简洁地复原当时的社会状况。

11.4.2 考古 GIS 中空间数据的分层

考古 GIS 中使用的数据包括考古遗址的空间数据和属性数据及其相互间的连接。空间数据是指各种遗迹所处的空间位置，属性数据是指遗迹的内容、说明等。空间数据包括地形图、专题地图、遥感影像等等。空间数据的输入就是将这些图形或影像运用数字化仪、扫描仪等设备输入到计算机中的过程。属性数据包括现有的各种考古资料，即考古钻探、发掘的所有记录、分析资料、研究论文、报告、专著等等。各种数据都需要进行一些处理，然后才能在 GIS 软件的支持下，分别建立考古 GIS 数据库，依次调入配准好的栅格数据与矢量数据，建立与编辑属性数据库(彩图9)。

GIS 数据库中往往有很多数据，需要将数据按逻辑类型分成不同数据层进行组织和管理。在栅格数据结构中，每类属性数据常用一个独立的层来表示，因此，理论上栅格数据层的数量是不受限制的。在矢量数据结构中，常按空间数据的逻辑关系或专业属性进行分层。例如，

地形图数据可分为地貌、植被、水系、道路、居民点等图层。当对某地区的地形进行分析时,需要将相关的图层进行统一的分析、处理和显示。

空间数据分层后,各层数据常具有同类的空间特性(点或线或面)、相同的使用目的和方式、同类的数据源、同类的属性信息、各层图具有同样的比例尺。空间数据可以按专题、时间和垂直高度进行分层:

1. 数据的专业类型是数据专题分层的主要依据,按空间数据的类型和属性进行分层,可简化处理过程和方法,如将一个区域内卫星影像、等高线、水系等分别作为一个图层。但有时需适当考虑数据间的关系及不同数据类型的应用功能,例如为了分析水资源问题,可将河流、湖泊、水库、沟渠、水井放在同一图层,以便于分析。

2. 时间序列分层的实质是用不同时间的图层来表示时态空间数据,补偿目前静态 GIS 无力表示动态空间数据的问题。如一个区域内不同时期的古代聚落分布图层。

3. 按地面垂直高度分层是用不同高度的图层来表示三维空间数据,补偿目前二维 GIS 无法表示三维空间数据的问题。

GIS 数据库中诸多要素的排列方式也需要作合理的安排,以便在同时显示诸多属性时,上面图层对下面图层的叠压和覆盖最少。一般情况下,以遥感影像或数字地面模型等栅格数据作为底图,然后再依次叠加等高线、水系、道路、居民地等现代地物,最后再依次加入面状、线状、点状等的考古遗迹图层。

在聚落考古 GIS 中排列聚落要素时,考虑到从早到晚的先后关系,一般都是从下到上排列。但是这样排列也存在着一些问题,比如同一个地点晚期聚落的规模往往比早期有所发展,面积上有所增加。几个时期的聚落同时显示时,晚期聚落会遮挡早期的聚落。考虑到多时期聚落同时显示的情况并不多见,空间分析时经常要研究某一时期聚落与环境要素的关系。所以聚落图层的时间先后一般是从下到上排列。

11.4.3 考古发掘中 GIS 的建设

考古 GIS 建设首先应该表现在考古发掘中,发掘墓葬或探方中获得的所有数据都可以在 GIS 中进行组织,建立考古发掘的图文数据库。图 11.8 为一个考古发掘区 GIS 系统的局部图形,探方大小为 5 米 ×5 米,在 GIS 中建立建筑基址、灰坑、墓葬、古代水渠等四个遗迹图层,此外还有 5 米 ×5 米与 25 米 ×25 米的探方格网、发掘区域范围等图层,

现代地物图层信息没有显示。每个遗迹图层还有对应的属性表，存储属性信息。例如墓葬图层可以设置编号、位置、方向、文化属性、年代推测、发掘面积、发掘经过、相关遗迹、层位关系、距地表深度、保存状况、茔域、地面建筑、形制与规格、壁龛、葬具、人骨、堆积层次、工具痕迹、取样情况、存在问题、附图号、附表号、照相号、摄像号、备注、记录者、记录日期等字段，用于记录每个墓葬的相关属性。其他遗迹图层中的属性表可以根据具体情况设定相应的字段，记录考古发掘中的大量信息。

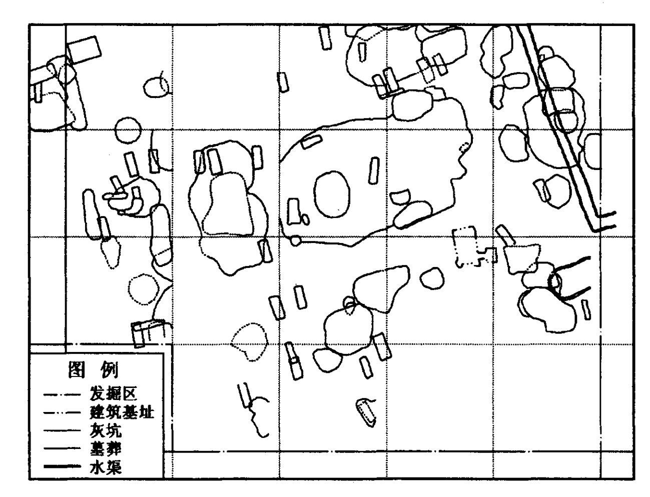


图 11.8　田野考古发掘 GIS 系统

在设置属性表各字段时，需要根据每个字段的内容选择字段类型。例如“墓葬面积”选择数字类型，“发掘经过”、“相关遗迹”等选择文本类型，“记录日期”选择日期类型等等。同时还需要设置各字段的大小，一般按每个汉字为 2 字节计算；字段大小设定后，输入该字段数据的字数就会受到限制，所以应该根据具体情况而定。字段设置情况与 Microsoft Office 中 Access 类似。

考古发掘中各墓葬、灰坑、建筑基址等的详细图形也都可以通过 GIS 表示，甚至可以表现墓葬中的器物、陶片分布等细节特征。然后针对不同的图层设置不同的显示比例，以便在不同显示比例的情况下，更好地展示特定的要素。发掘工作结束后，整个发掘区的 GIS 建设可以同时完成。这种资料应该最为清晰、全面，对整理发掘报告、开展后续工作以及遗址的保护规划等都具有重要的价值。

田野考古发掘 GIS 系统建成之后，可以根据需要进行空间叠置、查询等分析和研究，输出所需的各种图形、表格。生成的图形文件可以转换为 DXF 甚至是 TIF 格式，满足报告发表和展示等需要。

11.5　空间分析与研究

一个区域内各种考古遗迹或现象与周围环境之间都有着密切的联系,反映出当时人类的生存受到自然环境的严重制约。在聚落考古调查和发掘工作中,考古学家记录了很多有关考古遗迹或现象的空间数据,或者说那些数据具有重要的空间信息,所以能够运用空间分析的方法对一个区域内的考古数据进行研究,揭示考古遗址的分布与自然环境等因素的关系。

11.5.1　DTM 和 DEM

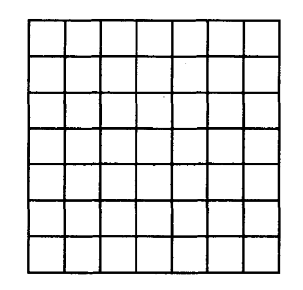
数字地形模型(DTM,Digital Terrain Model)是地形表面形态属性信息的数字表达,是带有空间位置特征和地形属性特征(如高程、坡度、坡向等)的数字描述。数字地形模型中地形属性为高程时称为数字高程模型(DEM,Digital Elevation Model),数字高程模型是投影平面上规则格网点的平面坐标(X,Y)及其高程(Z)的数据集,通常用地表规则网格单元构成的高程矩阵表示,其水平间隔可随地貌类型不同而改变。由于传统地理信息系统的数据结构都是二维的,数字高程模型的建立是一个必要的补充。广义的 DEM 还包括等高线、三角网等所有表达地面高程的数字表示形式。

数字地形模型被用于各种线路选线的设计以及各种工程的面积、体积、坡度计算,任意两点间的通视判断及任意断面图绘制。在测绘中被用于绘制等高线、坡度坡向图、立体透视图,制作正射影像图以及地图的修测,考古研究中也有很多类似应用。

11.5.1.1　DEM 的规则格网模型

规则格网(Grid)模型由规则的采样点数据组成,或把不规则采样点数据内插成规则点数据,而后,以矩阵形式来表示地面形状。在规则格网模型中,将空间区域分成规则的等距离单元,每个单元对应一个数值。在数学上,将这些数据表示为一个矩阵,矩阵中每个元素的值为该采样点的高程值。在计算机中这些数据表示为一个二维数组,每个数组元素对应一个高程值(图 11.9)。

对于每个格网的数值有两种不同的解释。第一种是格网栅格观点,认为该格网单元的数值是其中所有点的高程值,即格网单元对应的



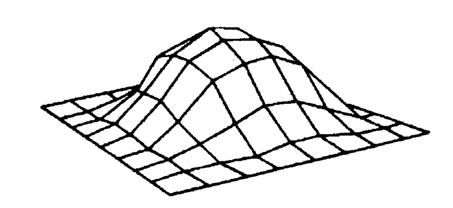


图 11.9 规则格网模型

地面面积内高程是均一的高度,这种数字高程模型是一个不连续的函数。第二种是点栅格观点,认为该格网单元的数值是格网中心点的高程或该格网单元的平均高程值,这样就需要用一种插值方法来计算每个点的高程。计算任何不是格网中心的数据点的高程值,可以使用周围 4 个中心点的高程值,采用距离加权平均方法进行计算,当然也可使用其他方法。

规则格网的高程矩阵,可以很容易地用计算机进行处理,特别是栅格数据结构的地理信息系统。它还可以很容易地计算等高线、坡度、坡向、山坡阴影和自动提取流域地形,使得它成为 DEM 最广泛使用的格式。格网 DEM 的缺点是不能准确表示地形的结构和细部,为此,有时需要采用附加地形特征数据,如地形特征点、山脊线、谷底线、断裂线,以描述地形结构。

11.5.1.2 规则格网模型的优缺点

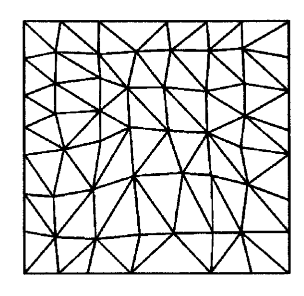
规则格网模型是 DEM 最广泛使用的格式。目前,很多国家都以规则格网的数据矩阵作为 DEM 的提供方式。规则格网数据模型具有数据结构简单,算法实现容易,便于空间操作和存储等优点,尤其适合在栅格数据结构的 GIS 系统中。

规则格网数据模型的缺点在于数据量大,通常采用压缩存储。面对不规则的地面特性,采用规则的数据表示,两者之间本身就不协调,所以规则格网不利于表示复杂地形。在地形平坦的地方,存在大量的数据冗余。

11.5.1.3 不规则三角网(TIN)模型

不规则三角网(TIN, Triangulated Irregular Network)是另外一种表示数字高程模型的方法,它既减少规则格网方法带来的数据冗余,同时在计算(如坡度)效率方面又优于纯粹基于等高线的方法。

TIN 模型根据区域内有限个点集将区域划分为相连的三角面网络，区域中任意点落在三角面的顶点、边上或三角形内。如果点不在顶点上，该点的高程值通常通过线性插值的方法得到（在三角形边上用边的两个顶点的高程，在三角形内则用三个顶点的高程）（图 11.10）。



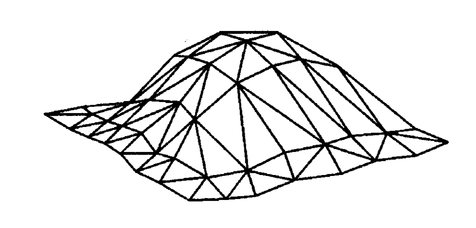


图 11.10 不规则三角网模型

TIN 的数据存储方式比格网 DEM 复杂，它不仅要存储每个点的高程，还要存储其平面坐标、节点连接的拓扑关系，三角形及邻接三角形等关系。TIN 模型在概念上类似于多边形网络的矢量拓扑结构。

不规则三角网模型由连续的三角面组成，三角面的形状和大小取决于不规则分布的测点或节点的位置和密度。不规则三角网与高程矩阵方法的不同之处是随地形起伏变化的复杂性而改变采样点的密度和决定采样点的位置，因而它能够避免地形平坦时的数据冗余，又能按地形特征点如山脊、山谷线、地形变化线等表示数字高程特征。

11.5.1.4 不规则三角网模型的优缺点

不规则三角网模型克服栅格数据中的数据冗余问题，表示地面形态效率高，数据精度高。它能较好地表示地性线，充分表示复杂的地形特征，适应起伏不同的地形。但是，不规则三角网模型算法实现复杂，由于形成三角网方法不同有不同算法，对特殊的地性线要调整。

通常大比例尺数字高程模型采用能表示地性线的不规则三角网，以便较精确地显示小区域地形特性；小比例尺数字高程模型通常可采用规则格网模型，以显示大区域宏观地形特性。

11.5.1.5 等高线模型

等高线以符号化模型来表示空间立体的形态，即用高程相等的相邻地面点连结成封闭曲线来表示连续递变的面状地形分布特征。等高线模型表示高程，高程值的集合是已知的，每一条等高线对应一个已知

的高程值，这样一系列等高线集合和它们的高程值一起就构成了一种地面高程模型（图11.11）。

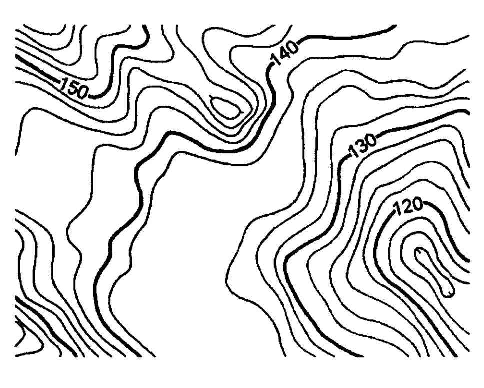


图 11.11　等高线模型

等高线通常被存成一个有序的坐标点对序列，可以认为是一条带有高程值属性的简单多边形或多边形弧段。由于等高线模型只表达了区域的部分高程值，往往需要一种插值方法来计算落在等高线外的其他点的高程；又因为这些点是落在两条等高线包围的区域内，所以，通常只使用外包的两条等高线的高程进行插值。

11.5.2　缓冲区分析

缓冲区又称影响区或影响带，是指围绕地理要素的一定宽度的区域。缓冲区是以某类图形元素（点、线或面）为基础拓展一定的宽度而形成的区域。在临汾盆地的研究中，各个时期的聚落基本上都是沿着河流分布，所以建立了河流缓冲区，并且发现全部聚落基本上都是在汾河各支流两侧大约600米的范围内，而汾河与滏河两岸的聚落则非常稀少（彩图10）。这个情况与其他一些地区的聚落分布特征比较一致，当时人们的生活与水源有着极为密切的关系，人们在选择居住地点的时候首先要考虑与水源的距离。研究区域的西南部地势较平坦，现在修建了一些人工水渠，很难发现自然河流的痕迹，当时自然河流遭到严重破坏，这里的聚落看起来显得与河流无关，但在当时应该是与河流有着密切的关系。

11.5.3　坡度与坡向分析

11.5.3.1　地面坡度计算

坡度和坡向是表示地面形态的两个重要因子，不管从物理意义上还是从地形分析的角度看，坡度和坡向都是不可分开的，没有坡度的地面也就没有坡向。在GIS软件中，地面坡度和坡向都可以由TIN或Grid直接生成。

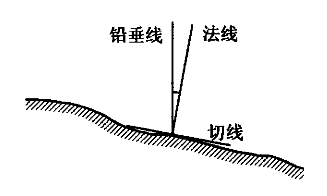


图 11.12 地面坡度示意图

坡度(Slope)是描述地形的重要参数,地面坡度是表示地表面斜坡的倾斜程度。由于空间曲面上不同位置的坡度是不同的,地面上给定点的坡度是曲面上该点的法线与垂直方向间的夹角(图 11.12)。坡度也可以定义为过地面点的切面与水平面的夹角。

由于点的坡度无实用价值,通常用平均坡度来描述地面的坡度。平均坡度可以取点位坡度的平均值;但更多的是用曲面拟合平面的倾斜度来表示曲面的斜度。

11.5.3.2 地面坡向计算

地面的坡向(Aspect)就是坡面的朝向,是坡面法线在水平面上的投影与正北方向的夹角。坡向粗略地可分为向南、向北、向东、向西 4 个方向。如将其细分,可分为向南、向北、向东、向西、向东南、向西南、向东北和向西北 8 个方向。在地学领域中,通常根据法线在水平面上的投影位置,将其分成阳坡、阴坡、半阳坡和半阴坡(图 11.13)。

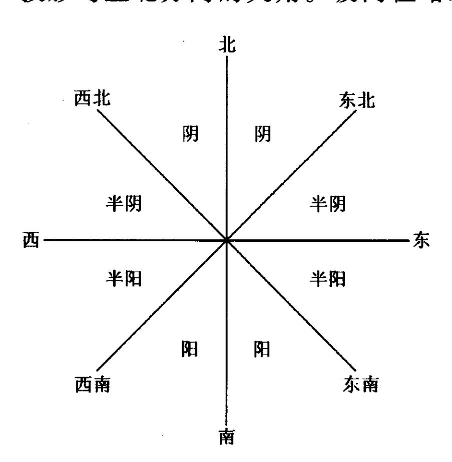


图 11.13 地面坡向分布图

通过 GIS 软件生成临汾盆地聚落分布的坡度分析模型之后,可以看出坡度在 1°以内和超过 3°的地带几乎没有聚落分布(彩图 11)。西部吕梁山沿线坡度很大,河流的落差也很大,不适合修建堤坝用来贮水,人类无法在这里生存。而坡度在 1°以内的平坦地带,可能是河流的稳定性很差,山洪爆发的时候经常发生河流改道等事件,不便于人们居住。而 1°至 3°的地带中,河道下切很深,河流较为稳定,适合人类的生存。

在坡向分析中,一般认为古人选择朝南的坡向居住时可以接收更多的光照,较少受寒冷的西北风的侵扰。但是该研究区域中聚落的分布与坡向的关系不很明显,其原因应该是各时期中人类的生存主要依赖于水源,选择合适的河段才是保证全年不断水的最重要条件,其他方

面的因素都是次要的，有时候不得不放弃。

11.5.4 可视性分析

可视性(Visibility)分析应该属于对地形最优化处理的范畴。可视性分析有两种情况，其一是通视性(Inter Visibility)分析，显示两点之间的通视情况，从而判断从一个观察点是否能够看到目标物(图 11.14)。其二是可视域(Viewshed)分析，研究从一个或多个观察点可以观察的区域。

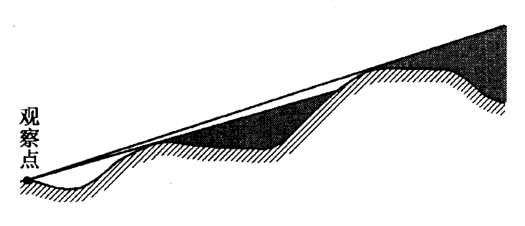


图 11.14 可视性示意图(灰色区域为不可视)

遗址或聚落的可视范围或一组遗址能否相互通视的情况，在考古学的景观结构中有着极为重要的作用。古代战略要塞或墓冢往往位于地势较高的位置，所以可视域分析在考古学分析和解译中有着重要的地位。对于很多文化类型和人群来说，一个地域中视觉的影响力超过其他感官接收的信息，人们对一个地域可以感知其冷或热，气味或声音，但是视觉特性则能留下最深的记忆和暗示，常常形成对这个地域最基本的印象。

在临汾盆地的可视域分析中，以较为典型的仰韶、龙山、东下冯几个时期的大型或中型聚落为视点，分别建立相应时期的可视域，发现各个时期的小型聚落基本上都不在相应时期大型遗址的可视域内。龙山时期陶寺遗址的范围很大，研究中发现随着视点在遗址内位置的不同，其可视域有着很大的差别(彩图 12)。

产生这种情况的原因，或许能够从两个方面进行分析：其一是各个时期的人们选择聚落的时候，首先考虑的因素是距离水源的远近，生存的需要才是第一位的，在此基础上再考虑其他的因素。其二是在大型聚落内，人们可以修建很高的瞭望塔，或者选择聚落内地势最高的地方搭建瞭望台，这样可以看到周围的中小型聚落，牢固地掌握管辖地域内的各种情况；或者是在聚落附近的山顶上修建瞭望台，然后通过烽烟把信息传递到聚落内部。当然，古代聚落的可视域分析还应该考虑当时聚落周围的植被高度、聚落是否在同一时间内并存等诸多因素，否则很难符合当时的实际情况。

11.5.5 水文分析

水文分析就是研究地表水流等情况。GIS 软件可以根据地形数据模拟生成局部区域中水流的方向，计算出最小沟谷的集水区域。集水区域间的分界线就是分水岭，分水岭包围的区域称为一条河流或水系的流域。水文分析对考古学研究应该具有非常重要的意义，由流域产生的地形特征对古代聚落分布、人类生产活动等都具有最直接的影响。

水文分析是对格网 DEM 进行分析，如果只有 TIN 数据，首先需要将 TIN 转换成 Grid。格网 DEM 数据是一些离散的高程点数据，每个数据本身不能反映实际地表的水文特征。为了从格网 DEM 数据中得到流域地貌形态结构，需要生成一个清晰的流域地貌结构模型。

11.5.5.1 生成流向图

水文分析中首先需要定义 Grid 格网点之间的水流方向，对于每一个格网而言，水流方向是指水流离开此格网时的指向。在 ArcGIS 9. x 等软件中，中心格网的水流方向通过其周围 8 个方向的编码来确定（图 11.15）。方向值以 2 的倍数指定是因为存在格网水流方向不能确定的情况，此时需要将数个方向值相加，以便在后续处理中根据相加结果确定中心格网的水流方向。

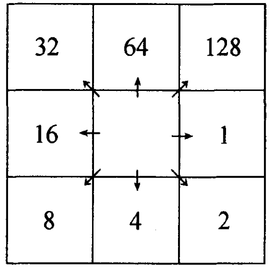


图 11.15 水流方向编码

水流方向分析中还有几种例外情况需要作特殊处理：

1. 如果一个格网点的最大坡向格网点与之具有相同的高程值，且之前没有其他格网点流向这个相邻格网，则强制流向它。如果还有另外的格网点流向这个相邻格网，则当前格网点为凹点。

2. 当两个或多个相邻格网点的最大坡向相等时，先比较各自相邻格网点坡向，如果仍没解决，继续比较相对格网点的坡向以决定流向。

3. 对于具有相同高程值的区域则扩大搜索窗口半径，用 7 ×7 窗口，如果需要还可以使用更大窗口。

4. 在 DEM 数据的外围加一圈高程值为 0 的格网点，强制其最大坡向流向研究区之外。这一点在有的软件中作为选项出现。

当所有的格网点处理完毕后,生成一个编码为1、2、4、8、16、32、64、128的流向图,再通过不同的颜色表示水流的方向(彩图13)。当然有的GIS软件使用其他方式对水流方向进行编码。

11.5.5.2 填充洼地

DEM是比较光滑的地形表面模型,但是由于存在DEM误差和洼地地形,使得DEM表面存在一些凹陷的区域,其水流方向不会指向流域出口,而是终止于凹陷点,导致计算水流方向时一些区域会产生不合理甚至错误的结果。所以在进行水流方向计算之前,首先应该对DEM数据进行洼地填充,得到无洼地的DEM数据。

洼地填充的基本过程是先根据水流方向数据计算出DEM数据中的洼地区域,再计算洼地深度,然后依据这些洼地的深度设定填充阈值,完成洼地填充。ArcGIS 9. x软件中洼地填充时,填充阈值为可选项,不必填写任何数值也能够直接根据DEM数据进行洼地填充。最后根据无洼地DEM重新生成新流向图,进行后续的计算。

11.5.5.3 计算汇流累积量

汇流累积量数值矩阵表示研究区域中每个点的流水累积量,可以根据水流方向数据进行计算。计算汇流累积量时,首先假设规则格网的DEM每点处有一个单位的水量,按照自然水流从高处流往低处的自然规律,根据区域地形的无洼地水流方向数据计算每点处所流过的水量数值,于是得到该区域的汇流累积量。

计算汇流累积量时,还可以根据区域内降水、土壤、植被等影响径流分布不平衡的因素建立一个权重矩阵,以便更精确地模拟该区域的地表特征。如果没有权重矩阵数据,一般系统默认为1。

根据汇流累积量还能够计算出水流长度,即地面上每一点沿水流方向到达其流向起点(或终点)间的最大地面距离在水平面上的投影长度。水流长度直接影响地面径流的速度,进而影响地面土壤的侵蚀力。水流长度的计算方式有顺流计算和溯流计算两种,顺流计算是计算地面上每一点沿水流方向到该点所在流域出水口的水平投影距离,溯流计算是计算地面上每一点逆水流方向到其流向起点的水平投影距离。

11.5.5.4 提取河网

汇流累积量图形已经基本上显示出河网的分布情况,由此根据地表径流漫流模型,当某一栅格的汇流量达到一定数值时,就会产生地表

水流，所有汇流量大于临界值的栅格就是潜在的水流路径，由水流路径构成的网络就是河网。

河网生成过程中汇流累积量阈值的设置非常重要，不同级别的沟谷对应不同的阈值，不同区域中相同级别的沟谷对应的阈值也不相同。在设定阈值时，应该通过不断改变数值大小和利用现有相关资料辅助检验的方法来确定阈值。再通过栅格计算的方法，得到栅格河网图形。最后将栅格河网矢量化，生成矢量数据河网图(图11.16)。

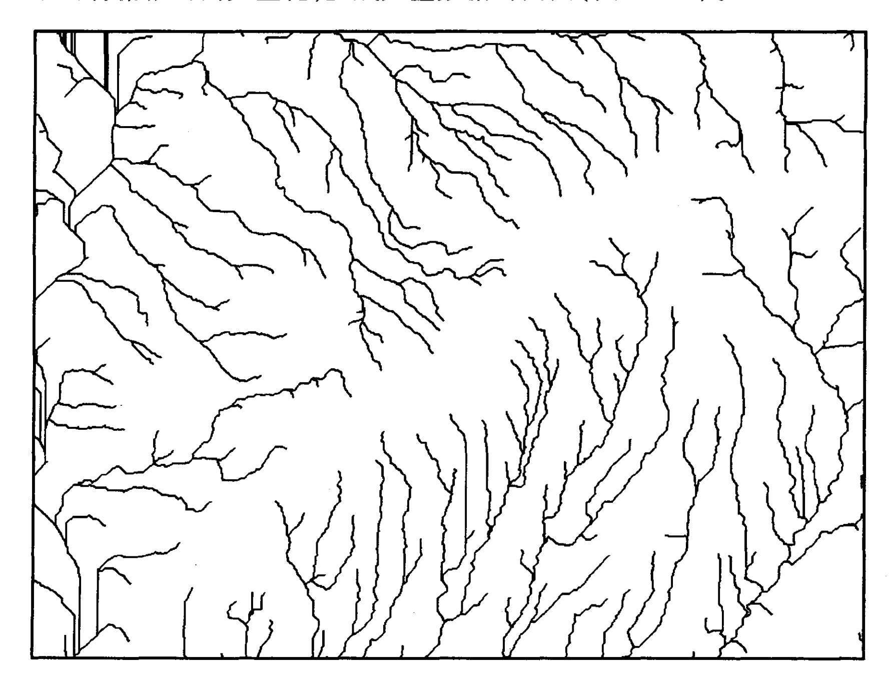


图 11.16 矢量河网图

11.5.5.5 流域分割

流域(Watershed)又称集水区域，是指流经其中的水流或其他物质从一个公共的出水口排出而形成的一个集中的排水区域，可以显示出每个流域汇水区域的大小。出水口(或点)即流域内水流的出口，是整个流域的最低处。集水区域间的分界线就是分水岭，分水岭包围的区域称为一条河流或水系的流域。

计算集水区域之前需要统计河网中结点之间的连接信息，得到每个河网弧段的起始点和终止点，然后便可以生成流域盆地和集水区域。

流域盆地是由分水岭分割而成的汇水区域,可利用水流方向确定出所有相互连接并处于同一流域盆地的栅格区域。首先,确定窗口边缘出水口的位置,所有流域盆地的出水口均处于分析窗口的边缘。其次,找出所有流入出水口上游栅格的位置,即可生成流域盆地集水区。

确定出水点之后,结合水流方向,分析搜索出该出水点上游所有流过该出水口的栅格,一直搜索到流域的边界,即分水岭的位置,便可以生成集水区域(图 11.17)。

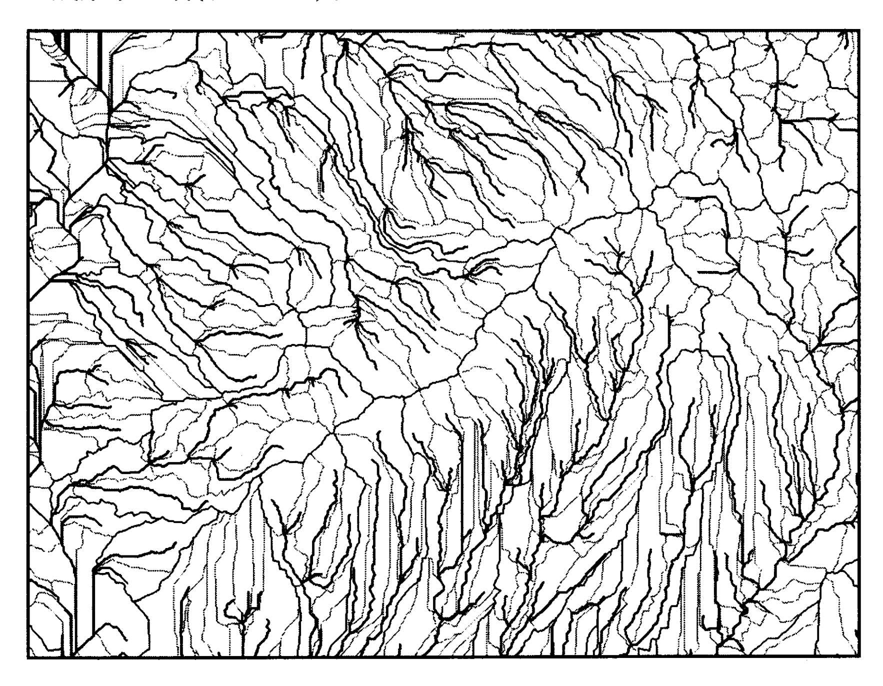


图 11.17 河网与流域图

通过 GIS 软件生成的集水区域,在地面有一定起伏的地带能够准确地反应地表水流的情况,但是在平坦的地带就不够准确,所幸平坦地带中分布的聚落较少。为了更好地反映集水盆地与聚落分布的关系,一般需要对 GIS 软件生成的流域进行一些编辑,按独立的水系将小的集水盆地进行合并,得到较为完整的集水盆地,以便准确地展示聚落与水系、集水盆地之间的关系。

根据临汾盆地中水文分析的结果,可以发现集水盆地的大小与其下游分布的聚落大小直接相关(彩图 14)。塔儿山西部与西南部独立

水系的集水盆地都很小,只有少量小型和中型聚落分布期间。而塔儿山的西北部与东南部的独立水系都具有较大的集水盆地,能够汇聚较多的水源,养活更多的人口,所以分布着很多大型乃至超大型的聚落。

11.6 空间信息的可视化

可视化(Visualization)是指运用计算机图形学和图像处理技术,将测量或科学计算过程中产生的数据及计算结果转换为图形或图像在屏幕上显示出来,并进行交互处理的理论、方法和技术。

可视化是一种计算方法,它将符号变为几何形体,是人脑印象构造过程的一种仿真,使研究者可以观察他们的仿真或计算结果,支持用户的判断和理解。其目的是便于人们理解现象、发现规律和传播知识。可视化提供了一种观察不可见事物的方法。

可视化的意义在于扩展了人类的视觉范围,使海量数据通过可视化变成形象,激发人的形象思维,得到高效的利用。可视化可以在人与数据、人与人之间实现图像通信,使人们能够观察到数据中隐含的现象,为发现和理解科学规律提供有力工具。可视化还能够实现对计算和编程过程的引导和控制,通过交互手段改变过程所依据的条件,并观察其影响。

11.6.1 科学计算可视化

可视化的研究起源于科学计算可视化,科学计算可视化是研究如何将科学计算过程及计算结果的数据转换成图形或图像信息,并进行交互式分析。科学计算可视化将一些抽象的理论、规律、过程和结果,形象化地用图形、图像直观地显示出来,使其更加生动、易于理解,从而大大提高了科学计算和分析的水平。同时,通过交互式分析,便于实现计算过程的引导和控制。

科学计算可视化应用领域十分宽广,既涉及自然科学的很多领域,也涉及各类工程计算,如分子模型构造的显示、天气云团的流动、地下水分布的预测等等。

11.6.2 空间信息可视化

空间信息可视化是指运用计算机图形图像处理技术,将复杂的科

学现象和自然景观及一些抽象概念图形化的过程。更具体地说,是利用地图学、计算机图形图像技术,将地学信息输入、查询、分析、处理,采用图形、图像,结合图表、文字、报表,以可视化形式,实现交互处理和显示的理论、技术和方法。

空间信息可视化是科学计算可视化在地学领域中的应用和体现。空间信息可视化和科学计算可视化关系密切,所用技术和方法有相同之处,但也存在着差异。两者的主要不同是空间信息可视化过程更强调数字化和符号化的概念,而且空间信息可视化描述的是地理空间内的事物,可视化过程实际上是对地理空间信息的提取和综合。

空间数据的特点决定了可视化是 GIS 必须要解决的理论和技术问题。由于可视化能迅速、形象地表示空间信息,在 GIS 的发展过程中,从一开始就十分重视利用计算机技术实现空间数据的图形显示和分析问题。

为提高空间信息可视化的实用性,在空间信息可视化研究中一直十分注意在地形图上显示地物要素,研究点、线、面要素在三维景观上的叠加算法。

11.6.3 空间信息可视化的特点

空间信息可视化的常规形式指二维平面上数据的可视化,但随着多媒体技术、三维动画技术、虚拟现实等新技术的出现,空间信息可视化内容日益丰富多彩。其特点表现为:

1. 可视化过程的交互性

指空间信息可视化技术要为用户提供使用、操作、控制、管理和开发系统的功能。表现为界面的交互性、信息查询的交互性、可视化过程控制的交互性等。

2. 信息表达的可视性

数据可以通过图像、曲线、二维图形、三维图形和动画来显示,并可以对其模式和相互关系进行可视化分析。

3. 信息表达载体的多维性

指空间信息可视化表达涉及多种信息载体,因此多媒体信息集成是空间信息可视化的特点。表示对象或事件数据的多个属性或变量,而数据可以按其每一维的值,将其分类、排序、组合和显示。

11.6.4 空间信息三维可视化

空间信息是一种三维信息,20 世纪 90 年代以来,三维物体的体特征可视化研究成为热点,三维及多维空间信息可视化研究深受关注。在 GIS 中,三维可视化研究最多,用得最多的是三维数字地面模型。在技术层面上,主要研究三维(多维)数据模型和数据结构、三维空间数据库管理系统、图形图像的实时动态处理等。

在三维仿真和三维图形的基础上,出现三维仿真地图,仿真空间地物的形状、光照、纹理,并在三维图形上实现三维测量和分析。十三陵的三维影像图中,可以清楚地显示出每个王陵基本上都位于一条山脉的前面,体现出传统皇家陵园的建造理念,可以从不同的角度对整个陵区或单个陵墓进行观察和研究(彩图 15)。

此外,基于多媒体技术的可视化,也是空间信息可视化中的重要内容。用图、文、声技术综合地表示空间信息是多媒体的特点。各种多媒体信息能形象、真实地表示空间信息的特征。

11.6.5 虚拟现实

虚拟现实(VR,Virtual Reality)是空间信息可视化的新方式,是对现实或虚幻现实的仿真模拟,通过人与计算机进行交互操作,产生与现实世界相同的反馈信息,生成一个逼真的视觉、听觉、触觉及味觉等三维感观世界,使人们感到仿佛置身于真实世界之中,用户可以直接用人的技能和智慧对这个生成的虚拟实体进行考察和操纵。

虚拟现实具有交互性(Interactivity)、想象性(Imagination)和沉浸感(Immersion)三个最突出的特征,或称“3I”特征。这也是 VR 与多媒体技术、科学计算可视化等相邻技术的区别。

交互性指参与者使用专门设备,能实现对模拟环境的考察与操作,例如用户可用手直接抓取模拟环境中的物体,且有接触感和重量感,被抓起的物体也应随着手的移动而移动。

想象性是 VR 与设计者并行操作,为发挥他们的创造性而设计的。想象性极大地依赖于人类的想象力。

沉浸感即投入感,其目的是力图使用户在计算机所创建的三维虚拟环境中处于一种全身心投入的感觉状态,有身临其境的感觉。

虚拟现实技术在考古研究中的应用(可以称为“虚拟考古”)就是

使用计算机技术生成逼真的三维古代环境、古代城市、考古遗址、考古发掘现场、考古博物馆等等，并配合相关的声音等信息。如同很多博物馆中制作一些考古遗址、墓葬的沙盘一样，虚拟考古可以根据考古调查、发掘的数据对当时情况进行虚拟，通过计算机动态地重现古代的历史片段或考古发掘现场等等场景，达到非常逼真的展示效果。同时也能够根据考古学家的假设或推断进行虚拟，检验假设或推断的可靠性。

虚拟考古的用户不仅可以观察考古数据，而且可以与虚拟考古的对象进行交互，具有从外到内或从内到外观察考古数据空间的特征。比如用手（通过传感器或跟踪装置）或其他三维工具来操纵古代模型、感知虚拟考古对象的触觉乃至气息等等。这样，考古学家可以充分地利用考古数据，从不同角度使用多种方式来研究考古学的问题，提高工作效率，更会节省大量的时间；非考古专业的人士则可以非常直观地感知考古研究的过程和内容，领略考古学家所揭示的古代社会“真实”面貌，走进视、听等多重效果十分逼真的虚拟考古世界。

11.7 结　　语

GIS 技术具有强大的数据存储、集成分析、图形制作与空间研究功能，在考古学研究中具有很高的应用价值，应该也必将贯穿于田野考古调查、发掘与研究的全过程之中。现在 GIS 方面的软件品种很多，国内一些高校和科研院所研制的中文 GIS 软件功能也非常完善，操作简单，很容易被考古研究人员掌握和使用，为考古领域大规模地使用 GIS 技术奠定了坚实的基础。GIS 技术进入考古学研究领域之后，田野调查、发掘的记录、图形、图像、表格等数据都可以通过 GIS 集成在一起，为考古学研究提供精确的制图、分析和模拟等材料，是考古学研究信息化的必由之路。GIS 可以将随处可见的环境、经济和社会等的信息，包括从整个陆地至显微镜下观察到的石器边缘等各种数据，不论它们的比例是否一致都能够集成在一起。

基于 GIS 的空间分析方法具有传统考古学研究无法比拟的优势，可以为考古学研究提供了一套重要的分析工具，揭示人类社会在不断发展过程中的社会特征以及对自然界的依赖关系，成为研究人地关系的重要工具之一。GIS 的空间分析方法很多，但并非所有的空间分析方法都能适合各种考古项目，只有在合适的考古项目中，慎重地运用 GIS

的一些空间分析方法，才能最大限度地发挥这些工具的潜力。同时，还需要有足够的考古调查与发掘等方面资料，对空间分析的结果作出科学的推理与解释，使 GIS 空间分析方法与考古学研究紧密地结合在一起。

在区域与都城等考古研究中，GIS 技术能够将地貌、水文、土壤、植被以及聚落分布信息集成在一起进行综合分析，揭示古代的人地关系及其发展、演变规律，解释考古学研究中的很多问题。同时也对考古学调查与研究方法提出新的要求，拓展新的思维模式，推动考古学研究不断地向前发展，丰富和完善考古学的理论与方法。

随着现代考古学研究的深入和 GIS 技术的发展，GIS 与测绘、遥感、虚拟现实、数据库和网络等空间信息技术在考古学研究中的结合和集成运用将更加频繁，是充分应用各种考古信息的重要手段，更是信息时代对考古学研究提出的要求。现代测绘技术或遥感成图技术能够精确获取考古遗迹的位置和图形、图像等数据，遥感技术可以对古代遗迹的形状、分布等进行勘探和分析，GIS 则是输入、编辑、管理和分析考古图形数据和属性数据的有效工具。同时，考古遗址的各种测绘数据能够直接输入到 GIS 之中，各种遥感影像数据经过配准后也能够调入 GIS 中，作为 GIS 的基本数据。GIS 可以对考古遗址中获取的各种数据进行综合分析和集成研究，也能够使用虚拟现实技术对不同的考古现象进行虚拟。应用 GIS 技术，能够建立不同规模的考古数据库，并通过网络技术将各个考古数据库连接成一个有机的整体。网络传输方面，下一代的虚拟现实造型语言（VRML）将更加直观地表现所有的信息，VRML 能够向人们展示交互、三维、动态、逼真的考古世界，客户端的计算机根据自身的计算及图形资源就能对网络上的图形进行渲染、描述和显示三维的考古资源。

参考文献

陈慧琳等.2001.人文地理学.北京:科学出版社.

李德仁等.2004.摄影测量与遥感概论.北京:测绘出版社.

宁津生等.2004.测绘学概论.武汉:武汉大学出版社.

武汉测绘科技大学《测量学》编写组.1991.测量学.北京:测绘出版社.

杨崇俊.1998.“数字地球”的初步研究.http://www.digitalearth.net.cn.

Karin Lund.2006.数字田野建档.中国考古学与瑞典考古学.北京:科学出版社.

Kenneth L. K.1999. Recent Directions and Developments in Geographical Information Systems. *Journal of Archaeological Research*,7(2).

Wilson, D. R. 1982, *Air Photo Interpretation for Archaeologists*, St. Martin's Press, Inc., New York.